

BUDAPESTI CORVINUS EGYETEM
TÁJÉPÍTÉSZETI KAR
KERT- ÉS SZABADTÉRTERVEZÉSI TANSZÉK

Oláh András Béla:

**A VÁROSI BEÉPÍTETTSÉG ÉS A FELSZÍNTÍPUSOK
HATÁSA A KISUGÁRZÁSI HŐMÉRSÉKLETRE**

DOKTORI ÉRTEKEZÉS

TÉMAVEZETŐ:

Mezősné Szilágyi Kinga, CSc

BUDAPEST, 2012

A doktori iskola

megnevezése: Budapesti Corvinus Egyetem
Tájépítészeti és Tájökológiai Doktori Iskola

tudományága: **agrár-műszaki**

vezetője: **Csemez Attila, DSc**
egyetemi tanár
BUDAPESTI CORVINUS EGYETEM, Tájépítészeti Kar
Tájtervezési és Területfejlesztési Tanszék

Témavezetők: **Mezősné Szilágyi Kinga, CSc**
egyetemi tanár
BUDAPESTI CORVINUS EGYETEM, Tájépítészeti Kar
Kert- és Szabadtértervezési Tanszék

A jelölt a Budapesti Corvinus Egyetem Doktori Szabályzatában előírt valamennyi feltételnek eleget tett, az értekezés műhelyvitájában elhangzott észrevételeket és javaslatokat az értekezés átdolgozásakor figyelembe vette, ezért az értekezés nyilvános vitára bocsátható.

.....

Az iskolavezető jóváhagyása

.....

A témavezető jóváhagyása

**A Budapesti Corvinus Egyetem Élettudományi Területi Doktori Tanácsa
2012.10.02-i határozatában a nyilvános vita lefolytatására az alábbi bíráló Bizottságot
jelölte ki:**

BÍRÁLÓ BIZOTTSÁG:

Elnöke:

Csemez Attila DSc

Tagjai:

Jámbor Imre CSc, DLA

Unger János DSc

Fekete Albert PhD

Wantuchné Dobi Ildikó PhD

Opponensek:

Mika János DSc

Balogh Péter István PhD, DLA

Titkár:

Fekete Albert PhD

I.	BEVEZETÉS	6
I.1.	Urbanizációs folyamatok	7
I.2.	A városklíma jelentősége, kutatásának története	9
I.3.	A településtervezés jelentősége, története.....	10
I.4.	A városi zöldfelületi rendszer jelentősége, kialakulásának története.....	15
II.	A VÁROSKLÍMA BEMUTATÁSA	22
II.1	A városklíma kialakulásának okai, a klimatikus hatás kiterjedésének mértéke.....	24
II.2.	Az energia- és a vízháztartás egyensúlya és annak módosulása városi környezetben.	26
II.3.	A város hőmérsékletének módosulása, a városi hősziget jelenség	30
II.3.1.	A városi hősziget általános jellemzői.....	31
II.3.2.	A városi hősziget kialakulásának elsődleges okai.....	37
II.3.3.	A városi hősziget hatásai.....	39
II.3.4.	A távérzékelés szerepe a felszíni városi hősziget vizsgálatában.....	41
III.	VIZSGÁLATI MÓDSZER	45
III.1.	A műholdas felvételezés szerepe a városi hősziget vizsgálatában.....	45
III.2.	Az ASTER szenzor és az általa készített hőmérsékleti infravörös felvételek bemutatása.....	48
III.2.1.	A alkalmazott felvételek felbontóképességének előnyei és korlátai	49
III.2.2.	A műholdas felvételeken szereplő hőmérséklet és a standard meteorológiai hőmérséklet összevetése.	53
III.2.3.	Az esettanulmányok jelentősége, alkalmazásának korlátai a városi hősziget vizsgálatánál	54
III.2.4.	A kiválasztott műholdfelvételek napjainak meteorológiai elemzése	55
III.2.5.	Az adatok feldolgozásának módszerei, egyéb adatforrások felhasználása	60
IV.	EREDMÉNYEK	66
IV.1.	A különböző területhasználat típusok és a városi hősziget összefüggései [Oláh, 2010a, Dobi et al., 2009]	68

IV.2.	Nagyméretű épületek hatása a városi hőszigetre [Oláh, 2010b]	74
IV.4.	A különböző vegetációs típusok hatása a városi hőháztartásra [Oláh, 2010c]	82
IV.5.	A vízfelületek hatása a városi hősziget szerkezetére [Csepely-Knorr et al., 2010c; Oláh, 2010d]	100
IV.5.	Az eredmények közvetlen felhasználhatósága, kiterjeszthetősége.....	109
V.	HASZNOSÍTÁS: A VÁROSI HŐSZIGET CSÖKKENTÉSI LEHETŐSÉGEI.....	113
V.1.	Építészeti módszerek, megoldások.....	114
V.2.	Tájépítészeti módszerek, megoldások	117
V.3	Településtervezési módszerek, megoldások Budapest példáján.....	122
VI.	ÖSSZEGZÉS.....	124
VII.	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	128
VIII.	FELHASZNÁLT IRODALOM.....	129
IX.	KÉPEK, DIAGRAMOK JEGYZÉKE	143
X.	FELHASZNÁLT INTERNETES FORRÁSOK.....	146

I. BEVEZETÉS

A témaválasztást napjaink környezeti és társadalmi folyamatai, és azok kilátásai különösen indokolják. A környezeti folyamatok közül első helyen kell említeni a globális klímaváltozást, amely a bolygó átlaghőmérsékletének emelkedésével jár. A jelenlegi prognózisok szerint a Kárpát-medence esetében az első néhány fokos globális átlaghőmérséklet-emelkedés során ezen átlagot meghaladó mértékű változás várható [Szász – Tőkei, 1997, 215-216. o.]. Már a globális klímaváltozás sem tekinthető csak és kizárólag környezeti problémának, hiszen kialakulásának jelentős antropogén összetevői is vannak [Szász – Tőkei, 1997, 213-214. o.]. A globális klímaváltozással ellentétben a városi beépítés alakulása és az ennek következtében létrejövő helyi klíma kialakulása egyértelműen emberi, társadalmi okokra vezethető vissza, illetve ezen esetekben olyan mértékű a környezet átalakítása, hogy többé már nem lehetséges ezen környezeti hatás figyelmen kívül hagyása (ellentétben a globális klímaváltozás jelenleg még nagyságrendekkel kisebb hatásaival, melyet egyelőre még jórészt figyelmen kívül hagynak). Mindenképpen szükséges alaposan vizsgálni, hogy a városaink kialakítása és használata hogyan változtatja meg ezen területek klimatikus viszonyait, illetve hogyan lehetséges a kedvezőtlen hatások mérséklése és kiküszöbölése.

Ezen munka célkitűzése a témában végzett vizsgálatok bemutatása, majd az azokra épülő javaslati rendszer kidolgozása, mely három szinten, építészeti, szabadterépítészeti és településtervezési eszközök szintjén kívánja bemutatni a lehetséges és kívánatos megoldásokat, melyek a vizsgálatok eredményein alapulnak. Ezen korszerű módszertanok és tervezési iránymutatók megfelelő mértékű alkalmazásával a negatív hatások kellő mértékben mérsékelhetővé (azaz kontrollálhatóakká) válnak.

Az értekezésem elején áttekintem röviden az újkori urbanizáció történetét, valamint a városklíma-kutatásról adok egy rövid összefoglalót. Ezek után feltétlenül szükséges összefoglalni a településtervezés történetét és azon belül (a városklímára gyakorolt nagymértékű hatása miatt) a települési zöldfelületek rövid történetét is. Mindezek után részletesebben tárgyalom a városi hősziget jelenséget, kialakulásának összetevőit, valamint intenzitásának és kiterjedésének (időbeli és térbeli) jellegét és mértékét, továbbá az azokat befolyásoló tényezőket. A következő részben részletesen bemutatom az általam végzett vizsgálatok módszerét, a vizsgálati helyszínt (Budapest), majd pedig a vizsgálatok alapján levont következtetéseket és elért eredményeket.

I.1. Urbanizációs folyamatok

Ha egy szóval szeretnénk jellemezni napjaink urbanizációs folyamatait, akkor a “gyorsuló” jelző volna a legtalálób. Gyakorlatilag ez a gyorsulás jellemezte az egész XX. századot, és ez a folyamat, mostmár elmondhatjuk, még inkább jellemző volt a XXI. század első évtizedére.

Ezen gyorsuló folyamat, urbanizációs trend több területen is észlelhető. Globális szinten nézve, a világ lakosságának folyamatos növekedése [Meyer – Turner, 1992] mellett (mely növekedés nem egyenletes, hanem egyre gyorsuló, exponenciális jellegű), az emberiség egyre nagyobb hányada él városokban [Rogers, 1982]. Ezzel párhuzamosan a városok mérete, amelyet első közelítésben azok lakosságszámával lehet jellemezni, szintén minden korábbi elvárást meghaladó növekedést mutat. Nagyon jól példázza ezt az 1 milliónál nagyobb lakosságú városok számának változása az utóbbi évtizedekben [Shlomo et al., 2005], mely szintén igen jelentős. Végezetül pedig meg kell említeni a minden eddiginél nagyobb metropoliszok létrejöttét, ahol a több 10 milliós lakosságszám a jellemző [Hall, 1997]. Ráadásul ezen trendben az elkövetkezendő néhány évtizedben egy hirtelen és radikális ugrás várható (amennyiben a jelenlegi urbanizációs trendek megmaradnak) hiszen amúgy is erősen városiasodott területek esetében (Kelet-Ázsia, Észak-Amerika keleti és nyugati partjai, a Nagy-tavak környéke, Dél-Amerika keleti partjának egyes részei), belátható időn belül több meglevő, már eleve több tízmilliós lakosságszámú város összenövése, összeolvadása várható [Yueguang, 2005].

A lakosságszám növekedése önmagában is komoly problémát jelent, mindezt azonban tovább súlyosbítja az építészet és a városi közlekedés változásának jelenlegi globális iránya. Azt lehet mondani, hogy jelenleg az általánosan, mindenhol megkövetelt életszínvonal növelésnek majd mindenhol egyetlen lehetőségét fogadják el, ez pedig a motorizáció mértékének, az épületek fajlagos energiafogyasztásának és a természetes ökoszisztéma felszámolásának drasztikus növekedésében nyilvánul meg.

A probléma egyik első hazai megfogalmazásában [Mika, 1999] mindezen városi folyamatoknak a súlyosbodásához hozzájárul a globális klímaváltozás hatása Európa jelentős részén, ahol az anticiklonális makroszinoptikus [Péczy, 1979, 118-119. o.] helyzetek számának és időszakainak növekedése várható. Ezen területek elsősorban a Mediterráneum (Törökország, Görögország, Ciprus, Olaszország, Málta, Spanyolország, Portugália, Franciaország földközi-tengeri partvidéke), valamint Közép-Európa jelentős része (Ukrajna egyes területei, Moldova, Románia, Bulgária, Macedónia, Albánia, Montenegró, Szerbia, Bosznia-Hercegovina, Horvátország, Szlovénia, Ausztria, Szlovákia, Magyarország) is. Eme régiókban a csapadékmennyiség csökkenése várható a hőmérséklet néhány fokkal emelkedése

mellett, valamint az anticiklonális helyzetek számának és gyakoriságának növekedése, amely szintén a további lokális felmelegedést segíti elő [IPCC-SREX, 2012, 11-13. o.]

Amint látható, hazánk területén is ez a kedvezőtlen, a városi klíma negatív tendenciáit erősítő forgatókönyv bekövetkezése várható. Ugyanakkor az urbanizációs trend sajnos a mi esetünkben is úgy alakul, mint ahogy a világ más részein. Ezzel szemben megtévesztő lehet a statisztika, mely szerint Budapest lakossága napjainkra a 2,1 milliós maximumról 1,7 millióra csökkent [KSH, 2011]. További megtévesztő adat, hogy a térségben a szennyezőanyagok kibocsátása nem nőtt jelentős mértékben az 1980-as évek óta [Brada et al., 1997]. Ami ténylegesen árulkodik a valós viszonyokról, az a Budapestről készített NDVI (normalizált, differenciált vegetációs index) mérés, amely az 1990-es és a 2005-ös biológiai aktivitást mérte össze műholdas adatok alapján, mely világosan kimutatta a zöldfelületek minőségi és mennyiségi degradációját [Gabor – Jombach, 2009, 241-251 o.]. A látszólagos népességcsökkenést pedig, ha kontextusba helyezzük, akkor láthatjuk, hogy valójában nem népességcsökkenésről, hanem a város kiterjedéséről van szó-, annak közigazgatási határain túlra. Amennyiben az egész Budapest agglomerációt [KSH, 2007] tekintjük, látnunk kell, hogy a Budapest közigazgatási határain kívüli települések alapvetően az új kertvárosi külső kerületek szerepét vették át, a lakosságuk jelentős része Budapestre jár be, nem csupán dolgozni, hanem vásárolni, szórakozni, iskolába és még orvoshoz is. A közösségi közlekedési hálózat, bár rendkívül lassan fejlődik, mégis világosan rámutat erre, hiszen majd minden ilyen település (legalább egy buszjárat erejéig) be van kapcsolva a városi közösségi közlekedési hálózatba [www.bkv.hu megnyitva 2012.03.25-én]. A Budapest agglomerációban élők száma a legutóbbi adatok szerint mintegy 3,3 millió fő [KSH, 2007]. Figyelembe véve az ország negatív népesedési rátáját, valamint azt, hogy az egész ország népessége immár kevesebb, mint 10 millió fő [KSH, 2010], így azt mondhatjuk, hogy az ország több, mint harmada egyetlen egy településen (még ha jogilag több külön közigazgatási egységre is tagolódik) él, így a globális trendek Magyarországra és azon belül Budapestre éppen úgy érvényesülnek, mint a világ bármely más nagyvárosára.

Az urbanizációs trendek ilyenén alakulása rendkívüli kihívásokat támaszt a települések felé, melyek annál nagyobbak és sürgetőbbek, minél nagyobb a település/város lélekszáma, területe, és minél nagyobb a beépítettség mértéke. Így paradox módon minél fejlettebb egy település, annál inkább kitett a klímaváltozás és az urbanizációs trendek negatív hatásainak.

I.2. A városklíma jelentősége, kutatásának története

Az előző fejezetben említett urbanizációs trendek olyan mértékű átalakítását jelentik a környezetünknek, mely már az éghajlat jelentős helyi megváltozását is eredményezi. Ezt a hatást a városok rohamos fejlődésnek indulása után hamarosan felfedezték. Az ipari forradalom [Hoppit, 2011] volt az a folyamat, melynek egyik logikus következménye a települések lakosságának, területi kiterjedésének, környezetterhelésének és környezeti átalakulásának rohamos növekedése lett. Ennek egyik leglátványosabb következménye, köszönhetően elsősorban az ipari forradalom alapját jelentő vívmánynak, a gőzgépnek széleskörű alkalmazását kísérő jelentős (és szabad szemmel is jól látható) légszennyezés volt. A másik jelentős hatás, amit szintén igen korán észrevettek, az a városok belső területeit jellemző jelentős hőmérsékletnövekedés (a városi hősziget jelensége) volt. A jelenség első részletes leírása 1833-ból származik és a londoni városklíma vizsgálatok eredményei között szerepel [Howard, 1833]. A továbbiakban, ahogy a városok mérete rohamosan növekedett, kialakultak az első városi meteorológiai állomások; nem elsősorban városklimatológiai, hanem általános éghajlati vizsgálatok végzésére és minél pontosabb és hosszabb távú előrejelzések létrehozására (amely még ma is elsődleges célja a meteorológiának).

Igazán nagy fejlődést az általános meteorológiában a XX. század második felében tapasztalhattunk, melynek alapvetően két oka volt. Az első ok a meteorológiai műholdak megjelenése [Taggard, 1994], melyek rendkívül részletes és hasznos (valamint igen nagyméretű) adat-mennyiséget gyűjtöttek a légkör általános állapotáról. Mindez jelentős segítséget jelentett a meteorológiai folyamatok mélyebb megértésében, valamint a pontosabb és hosszabb távú előrejelzést is lehetővé tette. Érdekesség, hogy magának a légkör pontos szerkezetének a megismerése igazából a nagy magasságú repülésekkel vette kezdetét melyek szintén gyakorlatilag a XX. század második felétől, az 1940-es évektől kezdődően váltak általánossá. A másik nagy jelentőségű folyamat a számítógépek megjelenése [Lynch, 2008], rohamos elterjedése és fejlődése volt, mely egyrészt lehetővé tette a meteorológiai műholdak által gyűjtött nagyméretű adathalmaz feldolgozását, másrészt pedig lehetővé tette meteorológiai modellek [Lynch 2006] kidolgozását. A meteorológiai modellek alkalmazása pedig még nagyobb pontosságot tett lehetővé az előrejelzés terén.

Napjainkra a számítógépes technológia és a műholdak szenzorainak felbontó képessége [NASA, 1999] lehetővé tette, hogy a városok klimatikus viszonyokra gyakorolt hatását modellezzük [Bruse – Fler, 1998], illetve további távérzékelési módszerek segítségével rendkívül részletes, már várostervezésben és akár épülettervezésben is használható mérési eredményeket kaphassunk [Unger et al., 2009].

I.3. A településtervezés jelentősége, története

A településtervezés története jóval hosszabb múltra tekinthet vissza, mint a városklimatológiáé. Már az ókorban is igen nagy jelentősége volt a városok tervezettségének, még akkor is, ha ennek oka elsősorban hatalmi, illetve vallási jellegű volt, nem pedig a városi folyamatok minél gördülékenyebbé tétele. Nagyon jó példa erre az ókorból Ekhnaton, az eretnek fáraó által alapított új főváros [Kemp, 1976], valamint a középkorból Bagdad városának példája [Abu-Lughlod, 1987] (1. kép), melynek egykori, csaknem szabályos kör alaprajzú kialakításának elsősorban vallási okai voltak.



1. kép: A középkori Bagdad látványterve.

Az újkor elején jelentkező reneszánsz, illetve barokk várostervezési módszerek és elvek legfőbb alapja a középkor végén felfedezett perspektíva és annak szabályai voltak, melyeket azután a világi, vagy az egyházi hatalom nagyságának kifejezésére használtak fel, ilyen például a Szent Péter tér Rómában [Kitao, 1974] (2. kép). A legutolsó ilyen jelentős városterv, melynek célja szintén csupán a hatalom reprezentációja volt, az a nemzetiszocialista Németországban készült, Berlin újjáépítéséről szóló terv volt [Greiffenberg, 2003] (3. kép). Meg kell jegyezni azonban, hogy az építészetben a szimbolizmus mind a mai napig jelen van és valószínűleg jelen is lesz, elég akár az organikus építészeti stílusra [Cook, 1996], vagy az újjáépített német parlament átlátszó kupolájára gondolni [Koepnick, 2001].



2. kép: A Szent Péter tér Rómában.



*3. kép: Berlin nemzetiszocialista
átépítésének terve.*

Ugyanakkor már az Ókortól kezdve a várostervezésben megjelentek olyan irányzatok, melyek a város élhetőségét és használhatóságát voltak hivatottak szolgálni. Milétoszi Hippodamoszt kell elsősorban megemlítenünk, aki a hellenizmus korának kiemelkedő építész volt. Terveiben megjelenik a derékszögű úthálózat, ahol két főutca található, melyek egymást keresztezik és a keresztezési pontban található a város főtere. Ez a szerkesztési elv egymástól függetlenül több helyen (kontinensen) és időben is megszületett és jellemzi a tervezett városokat, akár az ókori Görögországban, akár Kínában, akár Délkelet-Ázsiában, de ugyanígy a prekolumbiánus Amerika településeinél is. E szerkesztési elvnek ennyi helyen történő, egymástól független kialakulása gyakorlatilag bizonyítottan tekinthető.

Hippodamosznál érdemes megjegyezni, hogy az utcákat az uralkodó széliránynak megfelelően tájolta, amely figyelemreméltó abból a szempontból, hogy a korszak legjelentősebb légszennyezését (vagyis a szerves hulladékokból és a csatornázás hiányából származó szagokat) igyekezett csökkenteni várostervezési, építészeti módszerekkel, ezáltal is növelve a város élhetőségét [Burns, 1976]. Szintén tőle származik a gondolat, hogy az utcákat a szintvonalakkal párhuzamosan kell vezetni olyan területen, ahol a domborzat szerepe meghatározó a település fekvésénél.

A várostervezésnél nem lehet megkerülni az ókor végének nagyvárosait, Rómát és Konstantinápolyt. Ezek jellemzője egyrészt a csatornázás, mely Rómában jelent meg a Kr. e. VI. században, ami az első közműnek nevezhető [Gowers, 1995], majd a későbbiekben a Római Birodalom területén megjelentek a mind a mai napig megmaradt aqueductus-ok, vízvezetékek [Hopkins, 2007], vagyis a várostervezésnek immár nem csupán építészeti, hanem mérnöki vonatkozásai is megjelentek.

A középkor ebből a szempontból jelentős visszalépést eredményezett, legalábbis Európában. Meg kell jegyezni azonban, hogy ez nem mindenütt volt így, hiszen pont ebből a korból származik az első városi közvilágítás megjelenése, mégpedig a X. századi Cordóbából [Scott, 1904]. A középkorban ekkoriban egyetlen “közmű” volt meghatározó a városok esetében, ez pedig a városfal, illetve annak és a városi őrségnek a fenntartása és működtetése volt. Ugyanakkor a korban a városi élet szabályai, valamint szokásjog rendszere is összehasonlíthatatlanul szigorúbb volt, mint ahogy az napjainkban tapasztalható Európában [Jones et al., 1965].

A városfal, mint az egyetlen meghatározó városi elem léte, több következménnyel is járt. Először is, ami a legszembetűnőbb, hogy a középkori város szűk volt, utcái a lehető legkeskenyebbek, illetve minden telek a lehető legnagyobb arányú beépítésre került, csupán a szekerek számára szükséges szélesség, valamint a minimális fény bejutása az épületekbe az, ami meghatározta a terület beépítésének mértékét. Az épületek szintszámának és magasságának ekkoriban határt szabott az épületgépészet teljes hiánya, így 4-5 szintnél csak a legritkább esetben mentek magasabbra lakóházak esetében (a lift megjelenése az, amely lehetővé tette a nagy magasságú, nem szakrális funkciójú épületek kialakulását a XIX. század végén [Bletter, 1987]). A másik pedig, hogy az ily módon kialakuló város szerkezete szabálytalan volt, az utcák általában girbe-gurbák, a város szerkezete meghökkentően organikussá válik a legtöbb esetben (4. kép). Ennek oka az, hogy a kellő erőforrások híján a városfal által határolt terület nem lehet túl nagy, a város fejlődése pedig a korban csak azon belül volt lehetséges. Így a terjeszkedés mindig a falon belül történik, gyakorlatban mindig az éppen elképzelhető legjobb helyre, ennek eredménye a nagyarányú, látszólagos

rendezetlenséget mutató beépítés. Mivel a fal hossza nem lehet túl nagy, így a város alapterülete is meglehetősen kicsi, melynek pozitív eredménye, hogy gyalogosan le lehet bonyolítani a városon belüli személyforgalom teljes egészét, jármű csupán áruszállításhoz, illetve a városon kívüli utak megtételéhez szükséges. Napjainkban ezen városok kompaktsága, fenntartható közlekedési rendszere, festőisége, illetve a települési funkciók egymás mellett élése, egyenletes eloszlása városon belül, mely jelentősen hozzájárul a mobilitás minimalizálásához, rendkívül vonzó lehet, főleg amennyiben napjaink városainak fenntarthatóságát kívánjuk fejleszteni. Ugyanakkor ezen városoknak olyan társadalmi rendszere volt és olyan környezeti minősége (higiénia), melynek újbóli megvalósulása a mai emberek számára elviselhetetlen lenne, egy demokratikus berendezkedés esetén pedig megengedhetetlen.



4. kép: Lübeck jellegzetes középkori városszerkezete.

Az ipari forradalom a várostervezést is jelentős kihívások elé állította, egyúttal újra életre is hívta ezt a szakmát. Bár a reneszánsz és a barokk neves építészei folytattak várostervezési tevékenységet, ezek jellemzően egyes államok fővárosaira szorítkoztak (vagy pedig védelmi jellegűek voltak, mint pl. Palmanuova [Blumenfeld, 1949], vagy a japán erődvárosok [Hall, 1955]). Az ipari forradalom következménye elsőként a nagy kiterjedésű gyárak létrehozása, melyek tömegtermelésben állítottak elő árukat. Ezeknek nagy volt a munkaerőigénye, mely pedig az első “lakótelepek” kialakulásához vezetett, ezen iparnegyedek mellett. Mivel tömegtermelést valósítottak meg, a bejövő nyersanyag és az elszállított áruk mennyisége is nagyságrendekkel nőtt a középkori szinthez képest, és tetemes igény jelentkezett a mobilitás megnövelésére. Ezt Angliában (az ipari forradalom szülőhazájában) először csatornarendszer-bővítéssel [Turnbull, 1987] és a vízi szállítás szerepének megnövelésével, majd pedig a XIX. század elejétől az új találmány, a vasút

segítségével oldották meg [Rolt, 1910]. Gyakorlatilag tehát azok a várostervezési elemek (a város funkcióinak elkülönülése, elkülönítése és a technológiai fejlesztések használata a megnövekedett mobilitási igény kielégítésére), melyeket az építészet megfelelő stílusirányzata csupán 1933-ban szentesített az Athéni Charta-ban [Mumford, 1992], már az ipari forradalom első fázisának végére megvalósultak.

A várostervezést a XIX. században ennek a folyamata jellemezte és még olyan jelenségek is, mint a kertváros mozgalom, mely alapvetően az ipari forradalom negatívumaira keresett megoldást, a városi funkciók még fokozottabb elkülönítését segítette elő. A modernista mozgalom, mely a várostervezésben az Athéni Chartát tartotta követendőnek, lett a csúcsa ennek a folyamatnak. Ugyanakkor az 1960-as években a modernizmus véget ért, egyes vélemények szerint megbukott és a posztmodern követte [Jencks, 1973]. Jelen fejezetnek nem célja (és nincs is rá kerete), hogy bemutassa a modernizmus utáni stílusirányzatokat, hanem csupán egy igen rövid összefoglalást ad a modern utáni időszakról a várostervezés területén belül. Az 1960-as évektől kezdve egészen napjainkig jelentkezik egyfajta szkepticizmus a városi problémák megoldhatóságával szemben (ami teljes ellentétben áll a modernista felfogással), vagyis manapság nem igazán hisznek abban, hogy a város problémái megoldhatóak, azt pedig gyakorlatilag tagadják a szakma jelentős képviselői, hogy pusztán technikai, technológiai fejlesztéssel ezek a gondok megoldhatóak volnának (ld. például a Los Angeles School [Dear, 2003] tevékenységét). Fontos megjegyeznünk, hogy a 60-as évektől az élet csaknem minden területén megbukott a technokrata szemlélet, annak ellenére, hogy legalábbis az ún. nyugati világban a modernizmus fejlesztései is már demokratikus célokat igyekeztek szolgálni [Bullock, 1987]. Ugyanakkor a modern után előtérbe kerülnek egyéb módszerek és újfajta tudományok (szociológia [Ashley – Orenstein, 2005]) újfajta megközelítési módjai, valamint a településtervezés ún. soft vonala [Landry, 2008], mely a városlakókra és azoknak a szerves részvételére helyezi a hangsúlyt a város alakításánál. Az ilyen irányú remények szerint a városlakók elégedettségi foka nő, a város alakulása spontánabb lesz és olyan irányba alakul, mely hatékonyabban képes kielégíteni a városlakók igényeit. A társadalmi igazságosság a várostervezés egyik fő kérdésévé is válik egyúttal.

A kortárs irányzatok problémái lassan kezdenek megmutatkozni. Véleményem szerint egy 200 éven át alapvetően technológiai újításokon alapuló településfejlődés problémáit nem lehet megoldani további jelentős technológiai fejlesztések nélkül [Oláh, 2010g],[Oláh, 2011c], [Oláh, 2011d]. Különösen igaz ez a napjaink olyan jelentős környezeti problémára, melynek elsődleges “letéteményesei” a városok [Oláh, 2011a], [Oláh, 2011e]. A társadalmi problémák előtérbe helyezése a várostervezésben (és azok várostervezéssel történő megoldása) pedig

olyasmi, melybe a várostervezés újra meg újra belefut, elegendő csupán a XX. század. második felének nagy lakótelep építkezéseire [Taylor, 1998], illetve a szociális bérlakásépítés [Whitehead – Scanlon, 2007] fogalmára gondolni, melyeknek célja egyaránt az összes társadalmi réteg számára emberhez méltó lakhely kialakítása volt. Eleddig a társadalmi problémák megoldása városépítészeti módszerekkel nem bizonyult sikeresnek, jól bizonyítja ezt az is, hogy éppen ezen lakótelepek jelenleg jelentős társadalmi problémák színterei, melyeket ezen területek jelenleg folyó rehabilitációja sem tud érdemben megoldani [Taylor, 1998].

A jelen problémája (és trendje) a településtervezésben is a környezettudatosság, illetve a fenntarthatóság kérdése. Általános probléma az egész világon, hogy a társadalmi és technológiai folyamatok teljes áttekintése [Oláh, 2011b] szükséges ahhoz, hogy ténylegesen környezettudatos és előremutató várospolitikai döntéseket lehessen hozni. Sokszor ezen áttekintés helyett (illetve ezen áttekintő képesség hiánya miatt) általában a megszokott design alapú (esztétikai) szemlélet, illetve nagyon sok esetben a megőrzés, konzerválás szempontjai érvényesülnek. A modernizmus “funkcionalitásának” (amely inkább esztétika tagadás volt, mint igazi funkcionálisizmus) eredménye az is, hogy a posztmodern irányzatok jelentős része a modern előtti esztétikai irányzatok felé fordult, így a megőrzés, konzerválás szempontjai az uralkodó stílusirányzatok által is erősen támogatottak lettek napjainkra.

I.4. A városi zöldfelületi rendszer jelentősége, kialakulásának története

A mai értelemben vett városi zöldfelületi rendszer kialakulása szintén az ipari forradalom, illetve az azt követő igen nagy arányú városiasodás következménye. Mindenek előtt tehát tisztáznunk kell, hogy mit is értünk zöldfelületi rendszer alatt. A település zöldfelülete a jelenleg elfogadott definíció szerint [Jámbor, 1993] a következő: *„a zöldfelület olyan területhasználati egység, amelynek területe zöldfelületi létesítmények elhelyezésére szolgál, s amelynek kondicionáló zöldfelülete más területfelhasználási egységek területével szerkezeti egységet képez, a település más szerkezeti egységeit egymással és ezek együttesét a környező tájjal egybekapcsolja.”*. Egy település zöldfelületi rendszerének részei a kifejezetten zöldfelületi létesítmények elhelyezésére szolgáló területek, a különböző út és térfásítások, valamint a magánterületen található zöldfelületek is. Mindezek így együtt alkotnak egy rendszert, mely hatékonyan képes ellátni meglehetősen sokrétű feladatait. Ezen feladatok a kondicionáló hatás, a rekreációs szerep, az ökológiai értékek és a biodiverzitás megőrzése és fenntartása, a városszerkezet tagolása és adott esetben lazítása, valamint nem szabad

figyelmen kívül hagyni az esztétikai (és adott esetben térszervező) szerepét sem.

Érdemes idézni egy teljesen friss, nemzetközileg használt definíciót, az ún. zöld infrastruktúra definícióját [<http://www.greeninfrastructure.net/content/definition-green-infrastructure> megnyitva 2012.09.18-án]: *"a zöld infrastruktúra, természetes területeknek, művelt területeknek és egyéb szabadtereknek stratégiaileg tervezett és fenntartott hálózata, mely hálózat elemei megőrzik az ökoszisztéma értékeit és funkcióit, és így az ezekhez kapcsolódó a társadalom számára általuk biztosított előnyöket is."* Bár elsőre talán radikálisan másnak tűnhet, a két fogalom rendkívül szorosan kapcsolódik egymáshoz, csupán más megközelítésben kerültek megalkotásra. Azt mondhatjuk, hogy míg az első esetben inkább egy szabályozási jellegű definícióval van dolguk ("Mely területekre terjed ki?"), addig a második esetben inkább egy feladatorientált megfogalmazást láthatunk ("Mire való?"), hiszen a kondicionáló szerep és a zöldfelületi létesítmény azok az első definícióban szereplő fogalmak, melyek a zöld infrastruktúra definíciójában igazából ki vannak fejtve részletesen, míg az utóbbi definícióban meghatározott szerepű területek azok, amelyek egy városi zöldfelületi rendszer elemeit képezik (ahogy az pedig az első definícióban kerül részletezésre, egyfajta zöldfelületi szabályozási szempontból).

Ami a zöldfelületek történeti kialakulását, fejlődését illeti, már az ókorban is léteztek települési zöldfelületek, azonban nem törekedtek akkor még arra, hogy ez egy egységes rendszert alkosson, ami pedig a legfontosabb különbség, hogy céljuk akkoriban kizárólag a hatalom reprezentációja, illetve a személyi szükségleteinek kiszolgálása (illetve a kettő valamilyen szintű kombinációja) volt, mint például az ún. Szemiramisz függőkertjei, illetve a zikkuratok teraszainak fásítása [Dalley, 1993].

Kertek kialakítása a középkorban is jellemző volt, azonban ezek kizárólag magántulajdonban voltak és magáncélokot szolgáltak, még akkor is, ha adott esetben meghatározták a település jellemző arculatát és kiterjedtségüknel fogva kedvező hatással bírtak akár az egész településre (pl. Granada, Alhambra [Feierabend, 2004, 278-297. o.]). Egy érdekes és rendhagyó példát kell említenünk, amely ugyan nem feltétlenül tartozik időrendi értelemben a középkorhoz, hanem a kora újkorhoz, azonban az azt kialakító társadalmat tekintve, valamint, hogy egyértelműen az ipari forradalom előttre tehető a megvalósítása, ezért mindenképpen meg kell említenünk. Ezek a mogul birodalom kiterjedt fasor-, illetve ültetvénytelepítései. Érdekesség, hogy ugyan itt is megfigyelhető az a tendencia, mely a korszak (kora újkor) többi abszolút monarchiájánál is (Versailles-tól Pekingig), vagyishogy kiterjedt uralkodói és főúri kertek valósulnak meg, melyek akár több település teljes zöldfelületi rendszerének át- és megtervezésével jártak, azonban ezeknek a célja kizárólag egyvalaki személyes igényeinek a kielégítését szolgálta, nem pedig a közösségét. A mogul

példa kissé más, hiszen a kiterjedt útfásítások általánosságban minden úthasználónak (elsősorban a kereskedőknek és a hadseregnek) az igényeit is szolgálták. Az oka ennek a rendhagyó esetnek éppenséggel a klímában keresendő, ahogy azt az első mogul uralkodó, Bábur leírásából olvashatjuk [Feierabend 2004, 477. o.], Indiában elviselhetetlenül meleg, száraz és poros a levegő, melyeket a növényzet és a víz minél nagyobb arányú alkalmazásával lehet valamelyest mérsékelni. Napjaink emberének szempontjából is tanulságos az iménti példa annak fényében, hogy Báburnak és embereinek (a mogul uralkodó osztálynak és hadseregnek) egy sokkal forróbb é szárazabb klímához kellett rendkívül gyorsan (néhány év alatt) adaptálódniuk, hiszen egy hegyvidéki klímához szokott embercsoportnak kellett alkalmazkodnia az indiai szubkontinens rendkívül forró éghajlati körülményeihez. Mindezek figyelembe vétele tanulságos lehet a globális klímaváltozáshoz történő alkalmazkodási stratégiák kidolgozásakor is.

Az igazi, mai értelemben vett zöldfelületi rendszer kialakulására csupán csak az ipari forradalom után a jelentősen megnövekedett területű városokban láthatunk példát. Mai értelemben vett zöldfelületi rendszer kialakításra először az Amerikai Egyesült Államokban került sor [Csepely-Knorr, 2010a; Csepely-Knorr, 2011b]. Mindennek két oka van. Az első, hogy az Amerikai Egyesült Államok igen korán, az első országok között iparosodott, alig néhány évtizedes késéssel Anglia után, a XIX. sz. elején. A másik ok viszont az, hogy ezen városok angol társaikkal ellentétben, újak voltak. Az angol városoknak tipikusan volt egy középkori városmagjuk, melyek körül jellemzően főúri birtokok, rezidenciák, majd pedig kertek terültek el, melyeket azután megnyitottak a köz számára. Az Egyesült Államok városaiban azonban egyáltalán nem volt semmi ilyen korábbi várost szervező elem, hiszen azon városok mind újonnan alapítottak voltak, a legtöbb település az ipari forradalom hajnalán csupán egy erősített hely volt, például Detroit [Burton, 1912], illetve az Atlanti-óceán partvidékén található városok is inkább csupán falvak, illetve kisméretű telepek voltak [Burrows, 1999]. Ilyen esetben az erőteljes iparosodás városmorfológiai értelemben akadálytalan volt, azt legfeljebb a domborzat és a vízrajz adottságai befolyásolták.

A városlakók pszichés jólléte miatt, ahogy azt a kortárs források ki is emelik [Hirschfeld, 1785], nem volt tartható a végeláthatatlan homogén lakó- és ipari területek váltakozása, szükséges volt a városi szövet “fellazítása” és ennek kapcsán születtek meg az első zöldfelületi rendszertervek. Ki kell emelni Frederick Law Olmsted [Olmsted, 1997] nevét, akinek egyik leghíresebb terve a New York-i Central Park [Olmsted et al., 1983]. Más amerikai nagyvárosok parkjait és zöldfelületi rendszereit is ő tervezte, ilyen az Emerald Necklace [Zaitzevsky, 1982] (5. kép), mely Boston rendszerbe fogott zöldfelületeit jelentette, melyek mind a mai napig meghatározó elemét képezik a város zöldfelületi rendszerének.



5. kép: Az Emerald Necklace, Boston belső részének zöldfelületi rendszerterve

Fontos kiemelni, hogy ugyanilyen zöldfelületi rendszertervek kezdtek megvalósulni a XX. század első felében Európában, ez esetben már az Egyesült Államokbeli városok hatására. Az alapvetően tájképi kertstílusból kibontakozó közpark tervezés oda-vissza hatása rendkívül érdekes és tanulságos tervezéstörténeti szempontból [Csepely-Knorr, 2010a; Csepely-Knorr, 2011a]. Érdekes például Hamburg példája, ahol a korszerű elv és a középkori város jellegzetessége találkozott, vagyis az egykori erődítménnyel mentén húzódik a hamburgi belváros legjelentősebb körútja és amellet pedig a legjelentősebb közpark, mely gyűrű alakban fogja körbe a történelmi belvárost [Schreiner, 2007]. Ugyanez elmondható a bécsi Ringstrasse esetében is, mely az egykori városfal nyomvonalán kialakított gyűrűs zöldfelület [Capuzzo, 1998].

A következő rendkívül jelentős esemény a városi zöldfelületi tervezés történetében a kertváros mozgalom, mely Ebenezer Howard nevéhez köthető [Howard, 1902]. Ennek alapvető célja az élhetőbb település létrehozása volt, hiszen a XIX. századi munkásélet és a munkástelepek körülményei mindennek mondhatóak voltak, csak komfortosnak nem. Erre az időszakra, a XIX. sz. végére tehetőek a nagy munkásmozgalmak és tüntetések Nyugat-Európában és Észak-Amerikában. Ennek az időszaknak a talán legnagyobb eredménye szempontjukból a 8 órás napi munkaidő kiharcolása [Whaples, 1990], valamint a heti egy szabadnap (vasárnap) deklarálása volt. Mindennek a reformsorozatnak szociális szempontból logikus következménye volt Howard kertváros terve [Howard, 2010], mely az emberileg elviselhető munkaidőn túl a tényleges pihenést és rekreációt is lehetővé tevő kertvárosi otthon

kialakítását szorgalmazta, nagy távolságra a munkahelytől, mely jellemzően egy gyár volt és mint ilyen, összeegyeztethetetlen a 'zöld' és a 'nyugalom' fogalmával. Howard tervét mindenképp humánus okok motiválták és abban mind a magán-, mind pedig a közösségi zöldfelületek is igen nagy szerepet kaptak. Emellett az a városrendezési és zöldfelület-tervezési szempontból rendkívül előremutató elv is itt jelent meg, hogy a közcélú zöldfelületnek nem csak játékos pszichikai, hanem a védelmi/kondicionáló és városszerkezeti funkciója is jelentős, ami mindenképpen pozitívnak tekinthető. Egyúttal azonban itt jelent meg konkrétan tervi, tervezésméleti szinten a városi funkciók és területhasználatok teljes (külön kerületekbe történő) szétválasztása, mely később a modernista várostervezés egyik legfontosabb alapelve lett, ahogy azt az Athéni Chartában is szentesítették [Mumford, 1992].

Egy fontos eseményt kell megemlítenünk még, mely a XIX. század végén történt és várostervezési és zöldfelület rendszertervezési szempontból egyaránt jelentős. Haussmann báró Párizs átalakítása volt ez, mely városmorfológiai szempontból számít mérföldkőnek a várostervezés történetében. Ugyanakkor, bár az átalakítás eredetileg egyáltalán nem zöldfelületi jellegű, hanem rendészeti célzatú volt, itt fordult elő először, hogy a zöldfelület tervezés a többi tervezési feladattal (közművek) azonos helyet foglalt el a tervezési hierarchiában [Saalman, 1971].

A modernista várostervezés igen nagyvonalúan bánt a zöldfelületekkel, az általuk javasolt zöldfelületi arányok rendkívül kedvezőek voltak, azonban ennek oka nem a környezeti érzékenység, hanem az épített környezet, az épület és a városszövet radikálisan új értelmezése volt. Ezen tervezési stílus legfontosabb elemei a nagy, közösségi célú zöldfelületek kialakítása, melyekben szabadon, kizárólag égtáj, nem pedig városi geometria szerint tájolva állnak az épületek. A legradikálisabb képviselője ezen szemléletnek talán Le Corbusier volt [Jencks, 1973]. Az ő építészeti elvei közül érdemes kiemelni egyrészt az épületek lábakra állítását, mely szerint az eredményezi, hogy az épület alatt is természetes vegetáció alakul ki. Minderre természetesen az árnyékoltság mértéke és csapadék teljes hiánya miatt nem kerülhetett sor, ott a megvalósult esetekben csupán a csupasz talajfelszín, vagy jobb esetben a leburkolt terület lehetett. A másik elv, amely zöldfelületi szempontból jelentős, hogy az épületeket zöldtető fedje, amely így további vegetációs felületnek adhat otthont. Mindez csupán részben igaz, hiszen a tetőn tényleg kialakítható zöldfelület, azonban a speciális körülmények (vékony talajréteg, gyors csapadékvíz lefolyás, kitettség) miatt annak zöldfelületi értéke általában jelentősen alatta marad a természetes vegetációénak [Dunnett et al., 2008]. Le Corbusier és a modernizmus esetében két fogalomról kell még szólnunk. Az egyik a függőleges városi tömb [Serényi, 1967], a másik pedig a függőleges kertváros

[Fishman, 1982] fogalma. A függőleges városi tömb többé-kevésbé meg is valósult az Unité d'Habitation-ok [Jenkins, 1993] esetében. Lényegük, hogy a lábakra állított épületekben az egymás fölött elhelyezkedő, épületen belüli közlekedési folyosók töltik be az utca szerepét, míg a kert szerepét a minden egyes lakáshoz tartozó erkélyek veszik át. Mindez lehetővé (és szükségszerűvé) teszi az épületek közötti nagy tér hagyását, mely rendkívül nagy zöldfelületi arányt eredményez. A függőleges kertváros pedig ennek a logikus továbbfejlesztése, tehát a területnek csupán mintegy 10-15%-a van beépítve, az azonban rendkívül magas (felhőkarcoló) lakóépületekkel, amelyek így elérik, vagy túllépik a hagyományos városi beépítés laksűrűségét, azonban a területnek mintegy 80%-a mégis teljes mértékben zöldfelületként használható.

A modern kor a zöldfelületi rendszer szükségességét vitathatatlaná tette, ugyanakkor ez az időszak az, amelynek egyúttal azt az elképesztő környezeti terhelést is köszönhetjük, amely olyan nagy kihívásokat állít a városi zöldfelületeink (és úgy általában a városaink) fenntarthatósága elé. A Lipcsei Charta [Mega, 2010] az, amely mind a településtervezésben mind pedig a zöldfelületi rendszer-tervezésben tényleges újdonságot hozott a modernhez képest, hiszen ez az a hivatalos és egységes Európai Unió dokumentum, ahol először megjelenik a fenntarthatóság fogalma, ráadásul mint az európai városok tervezése során megkerülhetetlen követelmény. A másik nagy jelentősége ennek a dokumentumnak az Integrált Városfejlesztési Stratégiák (IVS) létrehozásának követelménye, mely rendkívül üdvös, hiszen a modernizmusban megszokottá vált az a technokrata szemlélet, hogy a város egyes részrendszereit (közlekedés, közmű, energia, távközlés, zöldfelület, építés) az arra hivatott szakma gondolja, csaknem kizárólagos jelleggel. Mindez pedig végső soron azoknak a területeknek az elszorításához vezetett, melyeknél ezen szakmák kooperációja elengedhetetlenül szükséges lett volna az ideális megoldások megtalálásához és megvalósításához. Ezen területek jellemzően a közterületek.

Napjainkra a Lipcsei Charta elveinek a gyakorlatba való tényleges átültetése a cél, melynek során a városi zöldfelületi rendszer szakmai körökben egyenrangú szerephez kell, hogy jusson a döntéshozatalban. Továbbá az Integrált Városfejlesztési Stratégia nem csupán egy kötelezendően elkészítendő dokumentum kellene, hogy legyen, melynek megléte csupán a sikeres Európai Unió pályázat előfeltételeként jön számításba. Budapest esetében rendkívül fontos a jelenlegi, még mindig átmeneti helyzetből fakadó potenciális előnyök minél nagyobb arányú kiaknázása. Fontos, hogy az 1990 előtti ipari területek, melyek jelentős része ma már átalakuló terület (barnamező), valamint városszerkezeti szempontból stratégiai helyzetben levő terület (a külső és a belső kerületek, kerületrészek közötti gyűrűt, láncot alkot), más módon kerüljenek be a XXI. századi városfejlesztésbe és területfejlesztésbe. Egyrészt, mint

problematicus területek, ne maradjanak továbbra is a jelenlegi lepusztult, szennyezett állapotban, és ne kerüljenek teljes mértékben valamelyik beépítésre szánt övezet kategóriába sem. Természetesen egy városi környezetben elképzelhetetlen, hogy az ilyen területek teljes egészükben zöldfelületté legyenek átalakítva. Pont a stratégiai helyzetük miatt rehabilitációjuknál az első feladatnak kell lennie, hogy lehatárolják a megfelelő arányú zöldterületeket, mely zöldterületek nem csupán kellő számúak és méretűek, hanem egyúttal zöldfelületi rendszert is kell, hogy alkossanak, illetve meglévő, ám hiányos zöldfelületi rendszereket, elsősorban zöld gyűrűket egészítenek ki.

II. A VÁROSKLÍMA BEMUTATÁSA

A városklíma [Landsberg, 1981] teljes bemutatása meghaladja ezen értekezés kereteit és nem is cél, a következőekben csupán nagy vonalakban ismertetném a városklíma általános ismérveit, tendenciáit és a napjainkban kialakuló legsúlyosabb problémákat, melyek közül néhányat részletesebben is megvizsgáltam. Nagyon fontos kiemelni, hogy a városklíma kialakulása egyértelműen az antropogén hatásnak köszönhető. Mára már bizonyítottnak tekinthető, hogy az antropogén hatás a globális klímára is hatással bír (globális klímaváltozás). Azonban a városklíma rendkívül markáns eltéréseket mutat, ráadásul jóval kisebb, földrajzilag jól behatárolható területen, mely eltérések már a múltban is minden kétséget kizáróan az emberi tevékenység következményeiként jöttek létre és vizsgálatuk már jó ideje egy külön területként szerepel a meteorológia tudományában.

Rendkívül fontos tisztában lennünk a városklíma térbeli kiterjedésével, léptékével. Az éghajlatban léptékük szerint három klímafogalmat szokás használni, mely a klímazonális övek alatti különböző léptékek elkülönítését szolgálja [Péczely, 1979, 175. o.]. Az első a makroklíma, mely egy nagyobb földrajzi egységre jellemző éghajlat, a második a mezoklíma, mely egy néhány 100 vagy néhány 1000 km² nagyságú területet jellemző, valamilyen szempontból a környezőtől eltérő jellegű klíma; a városklíma is ebbe a kategóriába tartozik. Végezetül a legkisebb léptékű egység a mikroklíma, melynek legfontosabb jellemzője, hogy eltérés általában rendkívül kis területet érint (maximum néhány ezer m², de akár csak néhány m² területet is érinthet). A mikroklíma csupán időszakos, speciális makroklimatikus helyzetekben áll fenn; jó példa például egy déli lejtőn található tömör kerítés, melynek déli oldalán több fokkal melegebb lehet a hőmérséklet, míg az északi oldala jellemzően fagyzugos hellyé válik a kerítés megépítése után.

Mint azt említettük, a városklíma jellemzően a mezoklíma kategóriájába tartozik, kiterjedése általában elég jól követi a város beépített területeit, magassági kiterjedése pedig a makroklimatikus viszonyoktól függ, jellemzően maximum 200-300 m magasságban érzékelteti még a hatását [Péczely 1979, 177. o.]. Természetesen mindezt erősen meghatározza az adott település földrajzi helyzete, valamint különösen nagy jelentősége van a természetes helyi tényezők közül a domborzat szerepének, jellegének. A városklíma kiterjedését térben és időben erősen meghatározzák a külső makroszinoptikus időjárási helyzetek, valamint az adott város jellemzői, melyek végső soron a városklíma kialakulásának okozói.

Mindazonáltal van még további két klímafogalom, melyet esetünkben mindenképpen

tárgyalni kell, ez a helyi klíma és az állományklíma fogalma. A hazai meteorológia tudományköre általában egyiket sem használja, a hozzájuk kapcsolódó klimatikus jelenségeket általában a mikroklíma, illetve némely esetben a mezoklíma példajaként tekinti. A fenti két fogalom sem ebből a tudományágból, hanem történeti kialakulását tekintve a kertészetből, illetve az erdészetből származik és onnan került át egyéb társterületek (tájépítészet, várostervezés stb.) fogalomtárába.

Az állományklíma fogalma alapvetően olyan jellegzetes növénytársulásokkal jellemezhető különleges klimatikus adottságú terület, ahol az adott növényállomány felelős a speciális klimatikus adottságok kialakulásáért és jellemzően ezen megváltozott klimatikus adottságok javítják az adott társulás életfeltételeit. Jó példa erre egy zárt, többszintes növényállomány, ahol a benapozás mértékének jelentős csökkenése (a talajszinten), a jelentős mértékű transzspiráció, valamint a talajszerkezet átalakulása (vízmegtartó képességének növelése) azok az elsődleges tényezők, melyek a hőmérséklet és a benapozottság csökkenését, valamint a relatív páratartalom növekedését eredményezik. A fentiekből következik, hogy mindezen klimatikus hatás így rendkívül erősen behatárolt, területileg csupán a zárt állomány határáig, míg magassági értelemben a zárt növényzet magasságáig (Európai lombhullató erdőben jellemzően 20-30 m-ig) terjed. Mindezek miatt, illetve a klímamódosító hatás kialakulása okán, elsősorban a mikroklíma tárgyalásánál lehet említeni meteorológiai szempontból, azonban jelentősége rendkívül nagy mind a kertészetben, mind az erdészetben, valamint a szántóföldi növénytermesztésben is, továbbá meg kell jegyezni, hogy ezeken az esetekben (erdészet, szántóföldi növénytermesztés) az állományklíma kiterjedése jelentősen túllépi a mikroklíma terek átlagos, maximális méreteit.

A másik klímafogalom a helyi klíma, amelyre sokféle megfogalmazás létezik, országonként eltérőek jellemzően, azonban közös vonás ez esetben, hogy a mikroklíma és a mezoklíma között helyezkedik el. Oke 1987-es *Boundary layer climates* művében például szerepel a '*local climate*' fogalom, önálló egyértelműen területi kiterjedés szerint van definiálva, vagyis a mikroklíma és a mezoklíma közti skála elemként. A fogalom kialakulása elsősorban olyan területekhez kötődik, melyeknek jól meghatározható saját klímájuk van, mely nem csupán átmeneti jelenséggént érzékelhető, ugyanakkor kialakulása alapján mikroklímának minősül, míg kiterjedése jellemzően a mikroklíma és a mezoklíma területek közé tehető. Jó példa erre a szőlőtelepítésre alkalmas területek Közép-Európában (ezen régiókban az ún. lejtőklíma is használatos szinonímaként a helyi klímára, bár annak csupán egy speciális esete). A fentiek értelmében az állományklíma a helyi klíma egyik speciális ágaként is értelmezhető. Mint a későbbiekben látni fogjuk mindkét (nem klasszikus) klímafogalomnak jelentősége lesz a vizsgálati eredmények kiértékelésekor.

II.1 A városklíma kialakulásának okai, a klimatikus hatás kiterjedésének mértéke

A városklíma kialakulásának több tényezője is van, jellemzően mindegyik antropogén. Ezen a hatásmechanizmusok egymással is kapcsolatban állnak és sokszor erősítik egymás hatását, jelentős nehézségeket okozva ezzel a városlakók számára.

A környezettől eltérő klimatikus hatás összességében nagyon sokrétű. Legjelentősebb két csoportja a légkör szennyezettségének foka és a megváltozott hőmérséklet. A városi hőmérséklet módosulását nevezik átfogóan városi hősziget jelenségnek [Péczy, 1979, 177. o.]. Kialakulásának oka elsősorban a városi energiamérleg megváltozása és ennek következményeképpen a hőmérsékleti egyensúlyi állapot eltolódása. Minderről bővebben lesz szó a városi hősziget részletesebb tárgyalásánál (II.3.).

A városi légszennyezettség mértéke napjainkban továbbra is rendkívül nagyarányú, azonban a szennyező anyagok koncentráció-változása szembeszökő tendenciákat mutatott az elmúlt 200 évben, köszönhetően elsősorban a technikai fejlődésnek és az egymást felváltó technológiák különböző típusú szennyezéseinek. Az ipari forradalom első időszakában, amikor a szén volt a meghatározó nyersanyag, a városi légszennyezés elsősorban ezen anyag égéstermékéből állt, így a szén-dioxid mellett meghatározó volt a kén-dioxid, a por-, és a korom-szennyezés (ún. redukáló típusú szmog [Leh – Chan, 1973]). Ahogy a kőolaj átvette a szén szerepét az elsődleges energiahordozók terén, valamint ahogy a robbanómotoros gépjárművek tömegesen kezdtek megjelenni, a városi levegőszennyezés is alapvetően megváltozott. Budapesten ehhez még hozzájárult az, hogy a szocialista rendszer által felfuttatott nehézipari termelésből adódó kibocsátás rendkívüli mértékben csökkent az 1990-es években miközben az igazi robbanás a gépjárművek számának elterjedésében is erre az időszakra tehető.

A gépjárművek motorjai által kibocsátott légszennyező anyagok jellemzően a szén-dioxid, vízgőz, dieselmotoros gépjárművek esetében jelentős a nitrogén-dioxid kibocsátás, valamint a különböző frakciójú szállóporok és az illékony szerves anyagok (VOC) [Harrington, 1997]. A közlekedési infrastruktúra folyamatos fejlődésével és terjeszkedésével az ilyen típusú légszennyezés is rohamosan nő. További probléma, hogy anticiklonális időszakban az UV sugárzás hatására másodlagos légszennyező anyagok, elsősorban ózon is képződnek (fotokémiai szmog [Dickerson et al. 1997]), melyeknek különösen nagy az egészségkárosító hatása. A különböző makroszinoptikus helyzetek jelentősen befolyásolják a szennyező anyagok feldúsulását és összetételét a légkörben. Mint ahogy említettem, direkt napsugárzás hatására előáll a fotokémiai szmog, mely olyan szennyezőanyagok megjelenését eredményezi, melyek felhős időben egyáltalán nincsenek jelen a légkörben.

A szélviszonyok alapvető hatással vannak a légszennyezettségre, hiszen erős szél esetén a szennyező anyagok koncentrációja jelentősen csökken. Ennek azonban az az ára, hogy a város szélalatti oldalán a szomszédos települések is jelentős szennyezésnek vannak kitéve, melyet nem ők okoztak. Az eső is jó hatással van a légszennyező anyagok légköri koncentrációjára, mivel ezen szennyező anyagok nagyrésze oldódik a vízben, így jelentős részük szabályosan “kimosódik” a légkörből [Finlayson – Pitts, 1986]. Sajnos a kisebb méretű légmozgásokat a városi felszín jelentős “érdessége” nagymértékben megakadályozza, továbbá egyéb, speciális időjárási helyzetekben a légszennyező anyagok jelentős feldúsulását eredményezi a város feletti légrétegben. Ezen időjárási helyzetek egyike az ún. “inverzió” kialakulása [Péczy 1979, 69. o.], melynek lényege, hogy egy hideg légréteg fölé egy melegebb csúszik, így stabil légrétegződés alakul ki, mely általában hosszú időn át fennmarad és a felszíni légszennyező anyagok nem tudnak kikerülni az alsó hideg légrétegből, így ott jelentős mértékben feldúsulnak. Az ilyen időjárási helyzetet nevezzük közkeletűen “szmoghelyzetnek”. A másik időjárási helyzet, mely ugyan nem eredményez ekkora koncentrációjú légszennyezést, ám általában nagy meleggel és fotokémiai szmoggal is párosul [Tiao et al. 1975]: a szélcsendes, napos, nyári anticiklonális időszakok, amelyek jellemzően hőségnapok [Robinson 2001] is szoktak lenni, így több szempontból is nagy megterhelést jelentenek a városlakóknak. A legújabb kutatásokat összefoglaló jelentés [IPCC-SREX, 2012] szerint az elkövetkezendő évtizedekben a mérsékeltövi kontinensek városainak nagy hányadában (így Budapesten is) ezeknek a városklíma szempontjából hátrányos makroszinoptikus helyzeteknek a gyakorisága valószínűsíthetően nőni fog.

Napjainkban jelentős vizsgálatok folynak a beépítések szélviszonyokat befolyásoló hatására, elsősorban szélcsatorna kísérletek [Goricsán et al., 2011] és számítógépes (CFD) szimulációk segítségével. Már ma is léteznek olyan programok, melyek le tudják modellezni egy adott terület beépítésének légkörzésre gyakorolt hatását [Bruse – Fleer, 1998]. A probléma napjainkra ennél súlyosabbá vált. Egyrészt a makroszinoptikusan kedvező helyzetekben napokig szélcsend van, ilyenkor nincs olyan tradicionális beépítés, mely légkörzést tudna indukálni. A másik probléma a városi motorgépjármű közlekedés növekedése, melynek eredményeként az elmúlt években Magyarországon már néhány százezer fős lakosságú városokban is akár 1 nap alatt kialakul a szmoghelyzet inverziós légrétegződés esetén [Péczy, 1979, 69. o.]. Tényleges megoldás csupán a városi közlekedés légszennyezésének radikális csökkentése lehet, a megfelelő technológiák segítségével [Oláh, 2011a].

II.2. Az energia- és a vízháztartás egyensúlya és annak módosulása városi környezetben

Az egyedi városklíma kialakulásának egyik legjelentősebb kiváltó oka, melyet az antropogén hatások idéznek elő, a városi felszín energia- és vízháztartási egyensúlyának módosulása. Természetesen a víz és az energia is kapcsolatban áll egymással, valamint mindkettőre jelentős hatással van a légszennyezés mértéke és az egyes szennyező anyagok koncentrációja. A kölcsönhatás meglehetősen bonyolult, és sajnos azt kell mondanunk előljáróban, hogy a különböző negatív hatások ez esetben is erősítik egymást.

A felszín energiaháztartását a különböző hullámhosszú, ki- és besugárzott elektromágneses sugárzások energiái határozzák meg. Városi felszín esetében alapvetően a ki- és besugárzás a meghatározó energiatranszport jelenség. A hővezetés jelentősége nem túl nagy, hiszen a talaj nagyon jó hőszigetelő, ahogy az jól ismert, Magyarországon már 80 cm mélyen sosem fagy át a talaj, 10-12 méteres mélységben pedig már egyáltalán nem érzékelhető az éves hőmérséklet-ingadozás [Péczy, 1979, 164. o.]. Ezzel ellentétben például a vízfelületeknél, illetve az óceánoknál igen jelentős a hőáramlás jelensége, vagyis a felszíni vígrétegek átkeverednek az alsóbb víztömegekkel, így sokkal mélyebben (40-50 m) is érzékelhető még az éves hőingadozás. Mindennek ugyanakkor az az eredménye (köszönhetően még a víz rendkívül magas hőkapacitásának/fajhőjének is), hogy az óceánok és nagyobb víztömegek közvetlen környezetében sokkal kiegyensúlyozottabb a hőmérséklet éves ingadozása [Péczy, 1979, 165. o.]. A másik jelentős befolyásoló tényező a légtömegek hűtő és fűtő hatása, mely igen jelentős lehet adott esetben, azonban mivel végső soron ezen légtömegek hőmérsékletüket a felszíntől nyerik, így csupán a légtömegek elmozdulása (advekciónak [Péczy, 1979, 148. o.]) az, ami adott helyen melegítheti, vagy hűtheti a felszínt. Tehát a felszín hőmérsékletének szempontjából rendkívül fontos (ha nem is kizárólagosan) a felszín sugárzási viszonyainak ismerete.

Az ózonréteg jótékony hatásának köszönhetően alapvetően csupán két csoportba lehet sorolni a felszínnel kölcsönhatásba lépő sugárzásokat; az egyik csoport az ún. rövidhullámú sugárzások (a látható fény is ide tartozik), illetve a hosszúhullámú sugárzások (jellemzően a hősugárzás). A rövid hullámhosszú sugárzás alapvetően a napsugárzás, melynek jelentős része (kivéve az ultraibolya és a még rövidebb hullámhosszú sugárzást) lejut a földfelszínre, egy elenyésző része pedig elnyelődik a légkörben. A földfelszínre lejutott sugárzás egy jelentős része onnan visszaverődik, a többi része elnyelődik. Ezen visszavert rövidhullámú sugárzás és az összes leérkezett rövidhullámú sugárzás hányadosa az albedó, azaz a fényvisszaverő képesség. Jelentősége rendkívül nagy a felszín energiaháztartása szempontjából. A

földfelszínről visszaverődött sugárzás egy kis része a légkörről visszaverődik megint a földfelszínre, nagy része pedig kisugárzódik. Mindezt a földfelszín rövidhullámú sugárzási egyenlege írja le (1.) [Péczely, 1979, 140. o.] ahol E_r a felszínen megmaradó energiamennyiség, S a bejövő sugárzás energiája, a pedig a visszavert sugárzás mértéke, vagyis az albedó:

$$E_r = S - aS = S(1 - a). \quad (1.)$$

A rövidhullámú sugárzás mellett meghatározó még a hosszúhullámú sugárzási egyenleg. A földfelszín esetében a légkör határán kívülről érkező hosszúhullámú sugárzás elhanyagolható. A földfelszín által elnyelt rövidhullámú sugárzás azonban elnyelődik (abszorbeálódik), majd hosszúhullámú sugárzásként bocsátódik ki a földfelszínről. Ez esetben is számolni kell a légkör sugárzás visszaverő, illetve elnyelő hatásával, vagyis a hosszúhullámú sugárzás egy részét visszatartja a légkör, míg a többi része kisugárzódik. A visszatartott hosszúhullámú sugárzás mértéke nagymértékben függ a légkörben kis mennyiségben jelenlevő, nem állandó gázok koncentrációjától, ezek az ún. üvegházhatású gázok, melyek közül legjelentősebb hatású a vízgőz és a szén-dioxid. A jelenleg elfogadott meteorológiai modellek szerint ezen gázok jelenlétének köszönhető mintegy 33 °C-os globális átlaghőmérséklet növelő hatás, amelynek köszönhetően a földfelszín átlagos hőmérséklete 15 °C. Mint látható az üvegházhatású gázok szerepe a földi élet szempontjából létfontosságú, hiszen nélkülük az átlagos felszínhőmérséklet pusztán -18 °C lenne [Péczely, 1979, 75. o.]. A hosszúhullámú sugárzási viszonyokat a hosszúhullámú sugárzási egyenleg (2.) [Péczely, 1979, 141. o.] foglalja össze, ahol E_h a felszín effektív kisugárzása, E_f a felszín hosszúhullámú kisugárzása, E_l pedig a légkör hosszúhullámú visszasugárzása a felszín felé:

$$E_h = E_f - E_l. \quad (2.)$$

A rövidhullámú és a hosszúhullámú sugárzási egyenleg összesítése adja meg a felszín teljes sugárzási egyenlegét (3.) [Péczely, 1979, 141. o.]:

$$E_s = S + E_l - aS - E_f. \quad (3.)$$

Az adott, lehatárolt földfelszín darab energiamérlegében még rendkívül meghatározóak az elsősorban a vízhez kapcsolódó fázisátalakulások, úgymint a párolgás és a

kondenzáció, melyek lokálisan jelentős hőtöbbletet, vagy hőelvonást eredményeznek. Ezeknek jelentős járulékos következményei is vannak, érdemes kiemelni például a felhőképződést, mely a sugárzási egyenleget is rendkívüli mértékben megváltoztatja (a rövidhullámú sugárzás sokkal kisebb része ér le a földfelszínre, illetve a hosszúhullámú kisugárzásnak is sokkal nagyobb része visszasugárzódik a földfelszínre). Mindezekén túl a különböző csapadékok is jelentős hatást gyakorolnak a felszín hőháztartására közvetlen (például lehűtés), illetve közvetett (albedó megváltozása hóesés után) módon. A helyi domborzati adottságok nagymértékben hathatnak a felhő-, illetve a csapadékképződési hajlamra, tehát mindez együttesen rendkívüli mértékben befolyásolhatja a felszín hőmérsékletét. További (általában elhanyagolható) hatás egyrészt a Föld belső hője, melynek mértéke állandónak tekinthető (általában), illetve a földfelszínen kialakuló egyéb hőtermelő folyamatok (antropogén hőtermelés, erdőtüzek stb.). A kondenzációs folyamatok ugyanakkor tehát meghatározóak az adott terület vízháztartása szempontjából is.

A felszíni vízháztartás rendkívül összetett rendszert alkot. Alapvetően meghatározzák a víz fázisátalakulásai és így szoros egységben van a hőháztartással. A csapadékképződés/kondenzáció, a párolgás és az olvadás, valamint a szublimáció (utóbbiak szilárd halmazállapotú felszíni víz; hó, illetve jég esetén fordulnak elő) azok az alapvető fázisátalakulások, melyek jelentős mértékben meghatározzák mind az energia-, mind pedig a vízháztartást. Az adott terület vízegyenlegét tekintve számolnunk kell veszteséggént a párolgással, a felszíni és a felszín alatti elfolyással. Nyereséggént lehet elkönyvelni a felszíni hozzáfolyást és a különböző szilárd és folyékony halmazállapotú csapadékokat. Az adott felszín vízháztartását jól jellemzi a felszín vízháztartási egyenlege (4.) [Péczy, 1979, 156. o.], ahol C a csapadék mennyisége, F a folyásból származó vízmennyiség, P pedig a párolgás, az elpárolgott víz mennyisége:

$$C=F+P. \quad (4.)$$

Párolgás esetében beszélhetünk evaporációról, amely a nyílt vízfelületek, illetve a talaj párolgását jelenti, illetve transzspirációról, mely a növények párologtatását (szabályozott vízleadását) jelenti. A kettő együttesen a teljes párolgás, melyet evapotranszspirációnak nevezünk. Egy gyakorlati szempontból rendkívül fontos mutató az ún. ariditási index, amely az éves csapadékmennyiségnek és a víz párolgáshőjének a szorzatát méri össze az éves hőösszeggel. Vagyis azt mutatja, hogy az éves hőösszeg a területre leesett éves csapadékmennyiség mekkora részét képes elpárologtatni (5.) [Péczy, 1979, 159. o.]. Ez esetben H az ariditási index, E_s a felszín teljes energiaegyenlege, L a víz párolgáshője, C

pedig a csapadék mennyisége:

$$H = E_s / (LC). \quad (5.)$$

Sivatagok esetében a legnagyobb az ariditási index (akár 10 feletti is lehet), míg 1 alatti érték esetében beszélhetünk nedves (humid) éghajlati viszonyokról. Mivel a párolgás meglehetősen szoros kapcsolatban van a felhőképzdéssel, ezért ahol jelentős a csapadékmennyiség, ott a napsütéses órák éves száma jelentősen lecsökken a felhők rövidhullámú sugárzásvisszaverő hatása miatt (trópusi esőerdők zónája a sivatagokkal szemben) [Péczy 1979, 136. o.]. Fontos megjegyezni, hogy Magyarország esetében, főként a domborzati és a geológiai/talajtani viszonyok miatt a csapadék nem határozza meg annyira egyértelműen az ariditási, szárazsági viszonyokat, mivel itt nagyon jelentős a hozzáfolyás (medence jelleg), illetve a talajvíz szerepe (különböző vízzáró rétegek és a hozzáfolyás eredményeképpen). A folyószabályozások időszaka mindezen változtatott és hazánkban is megnövelte az adott területre hulló csapadék szerepét, valamint egyes alföldi területek fokozott kiszáradását eredményezi napjainkban [Kovács, 2007].

A város mind az energiaháztartás, mind pedig a vízháztartás egyensúlyát jelentősen befolyásolja. Az energiaháztartásra, azon belül a teljes sugárzási egyenleg egyes tagjaira következőképpen hat: csökken az albedó, vagyis a városi felületek nagyobb mértékben nyelik el a bejövő hosszuhullámú sugárzást. Lokálisan nagyon magas az üvegházhatású gázok koncentrációja, így a légkör hosszuhullámú sugárzás megtartó képessége is jelentősen megnő. A városi felszíni anyagok fajhője jellemzően kicsi, így az elnyelt energia fokozottan növeli a hőmérsékletet. A nagymértékű légszennyezés valamelyest csökkenti a felszínre lejutó rövidhullámú sugárzás mértékét. Összességében az energiamérleg úgy módosul, hogy emelje a városi felszín hőmérsékletét, ahogy ezt majd később részletezni fogom (II.3).

A város hatása a vízháztartásra talán még drasztikusabb, mint az energia- és a hőháztartásra, ami végső soron ismét a hőháztartásra hat vissza úgy, hogy tovább erősíti a városi felszín felmelegedését. A városi felszínek jelentős része mesterséges burkolatú, illetve épületekkel fedett. Ezek egyrészt biológiailag inaktív felületek, jellemzően víztaszító anyagok borítják őket. Mindez azt jelenti, hogy a felszíni vízmegtartás mértéke rendkívül lecsökken, sok esetben a csapadék 100%-a lefolyik az adott felületről. A város jellemzője még a nagyarányú csatornázottság (felszín alatti csapadékvíz csatornák), melynek eredménye, hogy ezen kisebb felszínmozaikokról lefolyó víz teljes mértékben elvezetésre kerül. A burkolás további eredménye, hogy a felszín alatti vizek felszínre tartó lassú mozgása (az evapotranspiráció által indukált lassú vízáramlás) teljes mértékben megszűnik. A burkolás és a

csatornázás együttes eredménye, hogy a csapadékvíz nem tud helyben maradni, nem tud beszivárogni a talajba. A felszín nem működik vízmegtartó réteggént, melyből száraz időszakokban jelentős mértékű párolgás indulhatna meg, mely mérsékelhetné a felmelegedést. A vízelvezetés következtében a felszínre jutó és ott is maradó csapadékmennyiség mértéke hasonló, mint a sivatagi, jobb esetben félsivatagi körülmények közötti felszínre jutó csapadékmennyiség.

További rendkívül jelentős probléma, hogy az említett városi burkolatok és beépítés következtében a vegetációnak egész egyszerűen nem marad hely. A vegetáció hiánya az árnyékoltság csökkenését és a felszínt közvetlenül elérő rövid hullámú sugárzás mértékének jelentős növekedését eredményezi. A növényzet gyökérrendszere akár több méter mélységből képes felszínre hozni és ott hatékonyan elpárologtatni a vizet, továbbá hosszú távon a vegetáció jelentősen képes javítani a talaj szerkezetét és annak vízmegtartó képességét. Nem utolsó szempont, hogy a növényzet képes a beeső rövidhullámú sugárzás egy jelentős részét kémiai energiává alakítani, illetve valamelyest képes csökkenteni a légszennyezés mértékét. Összességében a felszín vízháztartásának módosulása a város élhetőségét csökkenti és ugyanígy hat az energiamérleg megváltozása is.

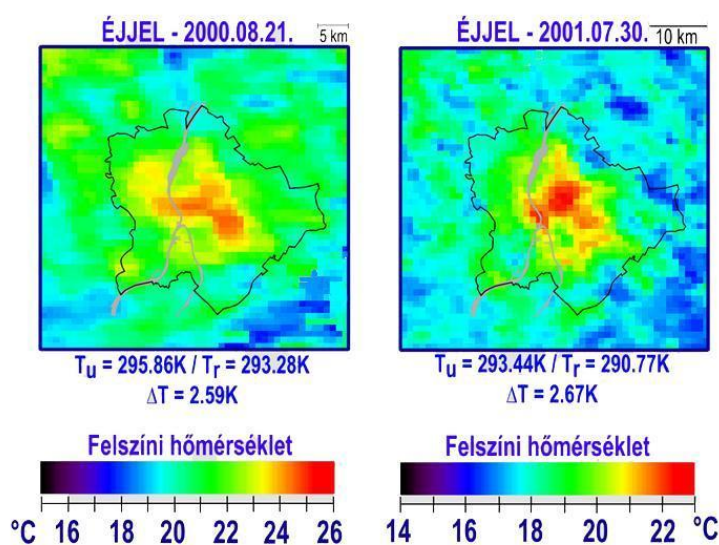
II.3. A város hőmérsékletének módosulása, a városi hősziget jelenség

Az előzőekben, a városi energiamérleg vizsgálatánál már röviden utaltam rá, hogy az energiaegyenleg és a besugárzási mérleg városhatás általi módosulása a városi felszín és a városi légtér esetében hőmérsékletnövekedést eredményez. Ez az úgynevezett városi hősziget jelenség [Unger, 2010], melyet már mintegy 200 éve észleltek a nagyvárosokban.

A jelenség rendkívül összetett, időbeli és térbeli kiterjedése, valamint maximális értéke a különböző hatások és folyamatok következtében folyamatosan változik. Elemzéséhez mindenképpen szükséges részletesen megismerni az általános jellemzőit, úgy mint a napi és éves menetét, kialakulásának napi és éves maximális értékeit, kiterjedtségének mértékét és az azt befolyásoló tényezőket, valamint a különböző makroklimatikus helyzetekkel való kölcsönhatását. Mindezekon kívül alapvetően fontos megismerni a jelenséget létrehozó, kiváltó elsődleges tényezőket és hatásmechanizmusukat, végezetül pedig a jelenség hatásait, melyek hatnak egyrészt az emberek általános egészségi állapotára és közérzetére, valamint a városi energiaellátó és közműrendszerek terheltségére és fogyasztására. A jelenségnek ismertetem néhány pozitív hatását is, hozzá kell tenni azonban, hogy a káros hatások Magyarország és Budapest esetében sokkal jelentősebbek és nagyobb mértékűek.

II.3.1. A városi hősziget általános jellemzői

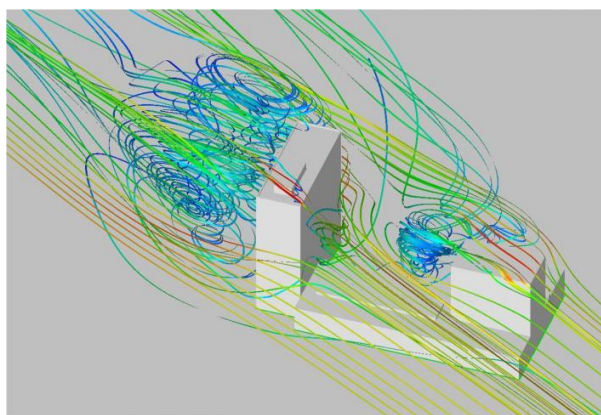
A városi hősziget, mint ahogy a neve is jelzi, a városi felületeken és azok felett egybefüggően, környezeténél magasabb hőmérsékletű zónát jelent. A fenti megkülönböztetés rendkívül fontos, mivel a közvetlenül a felszínen és a légtérben tapasztalható hősziget között jelentős eltérések adódnak (pl. a napi menetben, vagy az intenzitás eloszlásában). Mindenesetre a városi hősziget nevet jól illusztrálja (legalábbis a felszíni városi hőszigetet), ha egy műholdas felvételt (6. kép) [NASA 1999], vagy egy izotermákkal jellemzett hőterképet veszünk szemügyre [Oke 1982] .



6. kép: A felszíni hősziget jelenség termális infravörös műholdképen [NASA, 1999].

Rendkívül fontos a városi hősziget esetében, hogy a jelenség nem minden időjárási helyzetben alakul ki, vagy legalábbis nem egyforma mértékben. Kialakulásának kedveznek az anticiklonális meteorológiai viszonyok, vagyis a derült, felhőmentes ég és a szélcsend [Unger, 2010, 21. o.]. Az ilyen időszakokban detektálták minden nagyvárosban a városi hősziget maximumát. A szélviszonyokat érdemes kicsit részletesebben tárgyalni. A szélcsendes időszak kedvez a városi hősziget kialakulásának, azonban teljes szélcsendről nem lehet beszélni, hiszen pont a városi hősziget az, amely képes légmozgást indukálni a város területén [Péczy, 1979, 177. o.], még akkor is, ha makroszinoptikusan teljes szélcsend van éppen az adott területen. A jelenség magyarázata alapvetően a városi hősziget által kialakított termikus konvekció, vagyis a város felszíne felett, a hősziget maximuma környezetében kialakul egy feláramlás, amit a levegő felmelegedése okoz. A meleg levegő felemelkedik, helyére pedig a városperem felől hűvösebb levegő áramlik. Tehát azt mondhatjuk, hogy a városi hősziget saját

hűtését eredményezi. Olykor megfigyelhető egy hullámzó folyamat, vagyis, amikor a hűvösebb levegő beáramlik a városközpontba, akkor a termikus konvekció csökken, ami pedig az indukált szélsébséget is erősen lecsökkenti. Egy idő után, ahogy a beáramlott hűvösebb légtömeg is felmelegszik, ismét erősödik a termikus konvekció és a légáramlat ismét megindul [Unger, 2009, 26-27. o.]. A jelenséget alapvetően befolyásolja a felszíni sűrűlódás, amelynek ha nagy a mértéke, akkor ezt az igen gyenge légáramlatot akár teljes mértékben megszüntetheti. A felszíni sűrűlódást alapvetően meghatározza a felszín "érdessége", amelyet városi helyzetben elsősorban a különböző típusú beépítések és épületek határoznak meg. Adott esetben akár egyetlenegy nagyméretű épület képes egy légáramlási csatornát teljes egészében lezárni, nem csupán méreténél, hanem a körülötte kialakuló turbulenciánál fogva. A jelenséget nagyon jól lehet modellezni egy hasáb alakú épület esetében (7. kép.) [http://www.vzlu.cz/images/cfd_pro_stavebnictvi.jpg megnyitva 2012.03.25-én].



**7. kép: Beépítés és légáramlás számítógépes
(CFD) szimulációja**

A kisebb erősségű szeleket (melyek makroszinoptikus helyzetekből adódnak), a városi felszín megnövekedett sűrűlódása általában éppúgy képes eliminálni, mint azokat, melyeket a városi hősziget termikus konvekciója eredményez, úgyhogy ilyen esetben lényeges különbség nem érzékelhető. Nagyobb sebességű szelek azonban már jelentős hatást gyakorolnak a városi hősziget szerkezetére, egyrészt ugyanúgy eltolódás figyelhető meg a hősziget szerkezetében, mint a légszennyező anyagok eloszlásában, vagyis a szélfelőli oldalon a hőmérséklet csökkenése, az izotermák összesűrűsödése, míg a szélalatti oldalon a meleg mező kiterjedése (a meleg levegő ebbe az irányba történő áramlása következtében) figyelhető meg [Unger, 2009, 17. o.]. Nagyobb sebességű szelek esetében a szél egész egyszerűen "elfújja" a városi hőszigetet, egyrészt a légtömeg nem marad olyan sokáig a városi felszín felett, hogy az

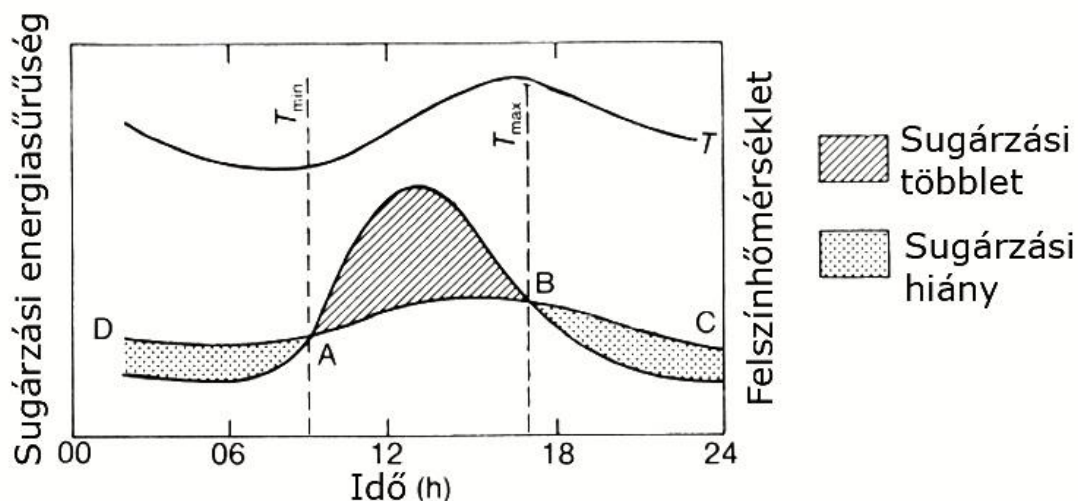
jelentősen felmelegítse, ugyanakkor a légáramlat hűtő hatása pedig megszünteti a hőmérsékleti többletet.

A másik igen jelentős befolyásoló tényező a szélviszonyok mellett a csapadékviszonyok, valamint a felhőborítottság mértéke [Unger, 2009, 21. o.]. Amennyiben a felhőborítottság jelentős, úgy a direkt beeső rövidhullámú sugárzás jó része visszaverődik a felhőkről és nem ér le a felszínre. Ennek következtében sok hatásmechanizmus, mely felelős a városi hősziget kialakulásáért, nem lép működésbe. Ily módon a városi felszín lecsökkent albedója és felszín borító anyagok kis fajhője nem okoz problémát, hiszen a beeső sugárzás mértéke jelentősen csökkent. Bár nem kapcsolódik közvetlenül a hősziget jelenséghez, de kedvező hatás, hogy ilyenkor a fotokémiai szmog sem alakulhat ki. Ami jelentősen lecsökken ez esetben, az a felszín teljes kisugárzásának mértéke, melynek a felhőréteg sugárzás visszaverő képessége lesz a fő oka. Amin a felhőborítás nem változtat, az az antropogén hőszennyezés és a városi felületek párologtató képességének hiánya, ennek következtében a városi hősziget jelenség ilyenkor is kialakul, azonban mértéke (maximuma) sokkal kisebb, mint anticiklonális helyzetben.

Amennyiben csapadékhullás (eső) is járul a felhőborítottsághoz, úgy annak már egészen kis intenzitása esetén a városi hősziget megszűnik. Ennek oka, hogy a víznek rendkívül magas a fajhője és a párologtatóhője, így a kis fajhőjű mesterséges városi felszínnek akármilyen meleg legyen is, rendkívül hamar lehűlnek az esőcseppek hőmérsékletére. Amíg a folyamatos nedvesítés fennáll (amíg el nem áll az eső), addig a városi hősziget nem tud újból kialakulni. További járulékos előnye a csapadékhullásnak, hogy a légszennyező anyagok jelentős része is kikerül a légkörből, valamint a városi vegetáció anyagszere folyamatai is intenzívebbé válnak, mely az esőzés után (a nedvesített felületekkel együtt) is hatékonyan képes egy kis ideig megakadályozni a városi hősziget újbóli kialakulását a csapadékhullás és a felhőborítottság megszűnése után is. A szilárd csapadékra (hó), amennyiben elolvad, nagyjából igaz ugyanaz, mint a folyékony halmazállapotúra, csupán a felszín hűtő hatása még intenzívebb, köszönhetően az olvadáshőnek és a szublimációs hőnek. Amennyiben a hótakaró tartósan megmarad, úgy a hőmérsékletnek folyamatosan 0°C alatt kell maradnia, amely esetben a városi hősziget káros hatásai elhanyagolhatóak, valamint az összefüggő hótakaró rendkívüli módon megnöveli a városi felszín albedóját, így a városi hősziget egyik legfőbb kiváltó oka (a beeső rövidhullámú sugárzás nagyarányú elnyelődése) megszűnik.

A makroklimatikus hatások mellett rendkívül fontos ismerni a városi hősziget időbeli eloszlását napi és éves szinten [Unger, 2010, 19. o.]. Napi szinten elmondható, hogy a városi hősziget maximuma a kora esti órákban, napnyugta után 1-2 órával jelentkezik, köszönhető ez

a napközben rendkívüli módon felmelegedett felszínek intenzív kisugárzásának. A hőmérséklet napi minimuma ugyanakkor a hajnali órákban jelentkezik, ekkorra már a városi felszín is lehül és még nem jelentkezik a Nap melegítő hatása, azonban magának a hőszigetnek a minimuma dél körüli órákra tehető. Nagyon fontos ugyanakkor ismerni a besugárzás és a léghőmérséklet kapcsolatát, azok napi menetének eltéréseit. A felhőborítottságtól és az egyéb eseti légköri befolyásoló (árnyékoló) tényezőktől eltekintve a napi sugárzási egyenlegről elmondható, hogy nappali órákban sugárzási többlet van, melynek mértékét elsősorban a napállásszög határozza meg, így a déli órákban a legmagasabb, míg az éjszakai órákban pedig kisugárzás történik, ez biztosítja a napi egyensúlyt. A hőmérséklet maximuma a délutáni órákban akkor adódik, amikor éppen megszűnik a tiszta sugárzási többlet, tehát a besugárzás és a kisugárzás mértéke egyenlővé válik (1. diagram) [Oke, 1987].



1. diagram: *A sugárzási mérleg (bevétel és kiadás) napi menetének standard felszíni modellje a hőmérséklet napi menetének feltüntetésével [Oke, 1987].*

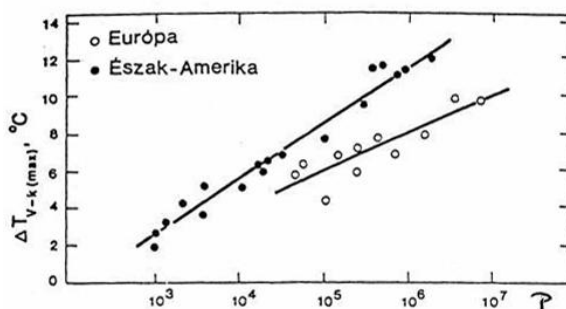
Éves szinten Budapesten a hősziget maximuma a téli időszakban jelentkezik a fűtésből származó jelentős hulladékhő miatt, illetve egy másodmaximum jelentkezik a nyári hónapokban, amikor a legintenzívebb a rövidhullámú besugárzás és így leginkább érvényesülnek a hőszigetért felelős hatásmechanizmusok. Érdekes adalék a hősziget éves menetéhez, hogy a legújabb budapesti kutatások alapján [Dezső 2009, 65. o.] elmondható, hogy bizonyos, kifejezetten száraz és meleg nyarú évek esetében a hősziget nyári maximuma kevésbé markáns, mint egyébként, ennek oka azonban nem a városi hősziget csökkenése, hanem a városkörnyéki területeken a vegetáció időleges kiszáradása, párologtatásának és

fotoszintetizáló képességének csökkenése. Vagyis nem a város melegedett fel kevésbé, hanem a városkörnyéki, vegetációval borított felületek melegedtek fel jobban.

Rendkívül fontos még a hősziget térbeli kiterjedésének vizsgálata. Mindenekelőtt meg kell említenünk a város méretétől való függést. A problémát már nagyon sokan vizsgálták [Oke, 1973; Park, 1987], elsődleges nehézségnek a város méretét meghatározó paraméter kiválasztása bizonyult. A város alapterülete egy kézenfekvő paraméter lehetne, azonban a beépítettség mértékétől és a zöldfelületi aránytól függően ez igen megbízhatatlan viszonyítási tényezőnek bizonyult. A leginkább elfogadott összefüggést Oke, az elismert városklimatológus adta meg az általa elnevezett formulában: ő a lakosságszámot használta paraméterként és annak függvényeként fejezte ki a városi hősziget maximális értékeit (Oke-formula (6.) [Oke, 1973]:

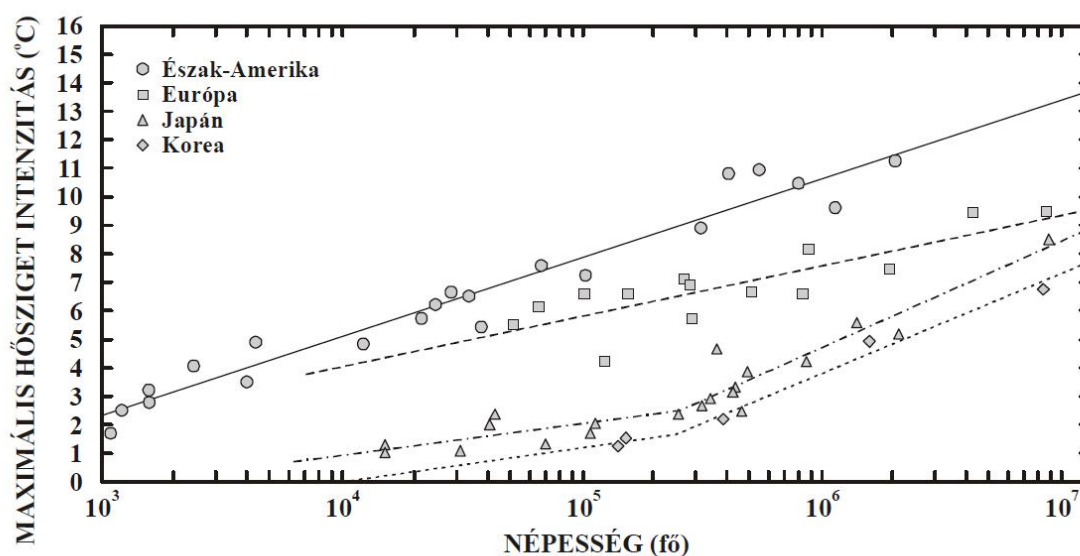
$$\Delta T_{\max} [^{\circ}\text{C}] = 2,01 \log P - 4,06. \quad (6.)$$

A formula egyértelműen rámutat a lakosságszám és a városi hősziget maximumának logaritmikus kapcsolatára, mely jelleg a világ minden táján kimutatható a mérések alapján. Azonban van két jelentős anomália a különböző országok, kontinensek között, ennek megfelelően a formulában szereplő konstans tényezők is kissé eltérőek a különböző kontinensek esetében (a fenti egyenlet az Európára vonatkozó Oke formula). Az első az észak-amerikai és az európai városok közötti különbség. Bár az exponenciális jelleg mindkettőnél megegyezik, azonban egy konstans szorzótényező eltérés található. Alaposabban megvizsgálva azt láthatjuk, hogy az ugyanakkora városi hősziget maximum érték esetén a lakosságszámok között egy nagyságrendnyi eltérés van, vagyis egy 10000 fős amerikai város produkál akkora hősziget intenzitás maximumot, mint egy 100000 fős (!) európai város (2. diagram) [Oke, 1973].



2. diagram: Az Oke formula logaritmikus skálán ábrázolva [Oke, 1973].

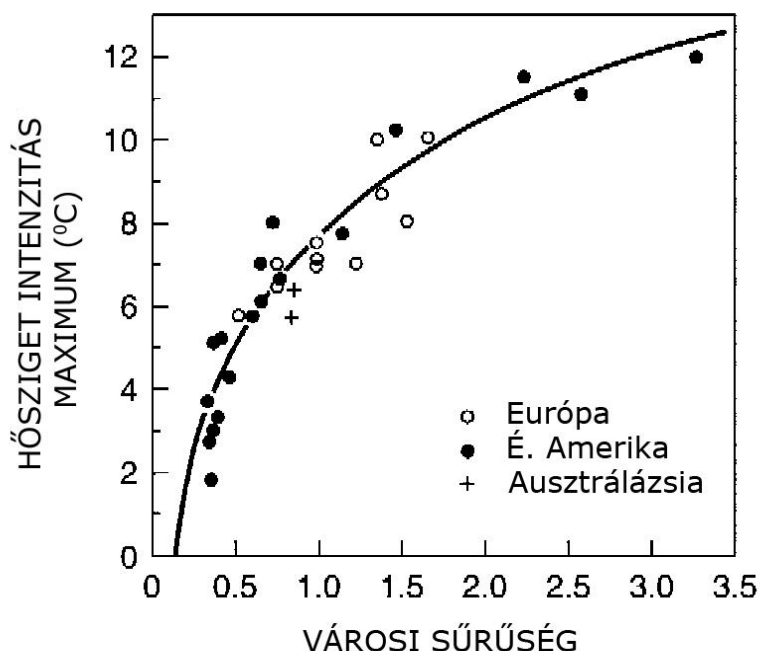
A másik anomália a kelet-ázsiai városok esetében figyelhető meg. Az összefüggés itt is exponenciálisnak adódik, azonban a logaritmikus skálán vizsgálva az eredményeket ezen országok (Dél-Korea, Japán) esetében egy érdekes változás figyelhető meg a tízezres nagyságrend környékén. Ezen határ alatt a hősziget maximumérték növekedése hasonló az európai városokhoz, míg ezen határ fölött a népességszám növekedésével a hősziget maximális értéke sokkal nagyobb mértékben kezd el nőni (az észak-amerikai nagyvárosokhoz hasonló mértékben). A logaritmikus skálán (ahol a függvényeket egyenesek ábrázolják) egy jellegzetes törés figyelhető meg ezeknél az eseteknél (3. diagram) [Park, 1987].



3. diagram: *A városi hősziget-intenzitás maximumának és a települések lakosságszámának kapcsolata különböző országok esetében [Park, 1987].*

A jellegzetes eltérések az eltérő településtervezési, szabadtérhasználati és építészeti anyaghasználati módokkal, röviden az eltérő városi, településhasználati kultúrákkal magyarázhatóak. A észak-amerikai nagyvárosok esetében egy főre sokkal nagyobb leburkolt terület, nagyobb épület alapterület és nagyobb energiafogyasztás jellemző, mint az európaiakra. A helyzet kisebb települések esetén ugyanaz az európai és a kelet-ázsiai városoknál, azonban a nagyobb lélekszámok esetében a kelet-ázsiai városok alapvetően megváltoznak, jellegükben jellemzően észak-amerikai stílusúakká válnak, azzal a különbséggel, hogy sokkal magasabb a népsűrűségük és a használati intenzitásuk, mint az észak-amerikai társaiké [Dick – Rimmer, 1998]. Mindezek fényében a görbék különböző jellege teljes mértékben megmagyarázható az eltérő városépítési, városhasználati szokásokkal. Azonban az is látható, hogy nem a lakosság száma a legtokéletesebb paraméter a városi hősziget kiterjedésének és intenzitásának (intenzitás maximumának)

meghatározásához, hanem inkább a beépítettség mértéke az, mindemellett pedig az épületmagasságok szerepe is nagy jelentőségű, ezért a "városi sűrűség", amit Oke városi intenzitásnak nevez (4. diagram) [Oke, 1987] lehet igazán jó paraméter, amelyet a magyar szabályozásban szereplő szintterület mutató fogalmával lehet azonosítani.



4. diagram: a városi sűrűség és a városi hősziget intenzitás maximumának összefüggése [Oke, 1987].

A városi hősziget maximumának értéke ennek megfelelően függ az adott település méretétől, lakosságszámától, valamint, hogy milyen építési kultúra és "városhasználati" szokások jellemzik az adott társadalmat. Épp ezért a maximális hősziget értékeket Észak-Amerikában és kelet-ázsiai nagyvárosokban mérték; itt a hősziget maximuma elérheti az 5-6 °C-ot és szélsőséges esetekben akár jelentősen meg is haladhatja azt [Oke, 1982].

II.3.2. A városi hősziget kialakulásának elsődleges okai

A városi hősziget kialakulásának több tényezője is van, jellemzően mindegyik antropogén. Amint azt látni fogjuk, ezek a hatásmechanizmusok egymással is kapcsolatban állnak és általában erősítik egymás hatását.

Ezen kiváltó hatások a következők. Elsőként meg kell említeni a városi felületek megváltozott rövidhullámú sugárzásvisszaverő képességét. A városi anyagok (tetők,

burkolatok stb.) jellemzően sötétebbek, nagyobb fényelnyelőképességűek, vagyis nagyobb az albedójuk, mint a természetes felszínborítás anyagainak. Ennek következtében megváltozik a felszín rövidhullámú sugárzási egyenlege [Péczy, 1979, 140. o.], melynek lényege, hogy a bejövő rövidhullámú (látható fény) sugárzás nagyobb arányban nyelődik el és alakul át hővé. A teljes sugárzási egyenleget tekintve mindez a felszín hőmérsékletének megemelkedését eredményezi.

Az adott város, település összesített albedóját még egy dolog befolyásolja jelentősen, ez pedig az adott terület tagoltsága. A fizikából közismert tény, hogyha egy adott felületnek megváltozik az érdessége, akkor megváltozik a színe is. Általánosságban az mondható el, hogy minél érdekesebb az adott felület, annál sötétebb (pl. sima és homokfúvott fém felületek közötti színbeli és fényvisszaverőképesség-beli különbség). Mindez nagyban is igaz a városokra. Tehát minél érdekesebb a városi felszín, minél változatosabb a beépítés és minél nagyobb az épületmagasság/utcaszélesség arány, a beeső fénynek annál többször kell megtörnie, mielőtt visszaverődik, így annál nagyobb hányada nyelődik el. Mindennek következménye, hogy még abban az esetben is, hogyha viszonylag jó fényvisszaverő képességű anyagok is borítanak egy épületegyüttest, hogyha az magasházas jellegű beépítés és viszonylag közel vannak egymáshoz az épületek (jellemzően a felhőkarcolókból álló üzleti negyedei a világ nagyvárosainak ilyenek) akkor összességében a bejövő sugárzást igen nagy mértékben fogja elnyelni az adott városi terület, amely elősegíti annak további felmelegedését [Gál et al., 2009]. A természetes felszínek esetében nincs ilyen probléma, hiszen a természetes domborzat csak egészen kivételes esetekben produkál olyan összetett felszíninformákat, amelyeknél nem csupán az anyagok és a felszínt borító vegetáció minősége, hanem annak jellegzetes morfológiája is jelentős a teljes felszín fényvisszaverő képessége szempontjából.

A következő kiváltó hatás ugyanezen városi felületek természetes anyagokénál (elsősorban a víznél) jóval alacsonyabb fajhője [Péczy, 1979, 164. o.]. Vagyis a várost borító anyagok (beton, kerámia, aszfalt stb.) ugyanannyi bejövő hőmennyiség hatására sokkal magasabb hőmérsékletre melegednek fel éppen ezért. A természetes felületek jó része jelentős víztartalommal bír, ami a legfőbb oka annak, hogy jelentősen magasabb a fajhőjük. Ugyanezzel magyarázható a sivatagok jelentős nappali felmelegedése, ahol a természetes felületek sem rendelkeznek víztartalommal, így rendkívüli mértékben fel tudnak melegedni.

Az előzőből következik a városi felmelegedés következő jelentős kiváltó oka, amely nem más, mint a városainkat csaknem 100%-ban jellemző teljes csapadékvíz-elvezetés (csapadékvíz csatornák kiépítettsége) [KSH, 2012]. Mindennek következménye, hogy a városi területek burkolt részéről a víz teljes mértékben elvezetésre kerül, ahelyett, hogy ott maradna, mely egyrészt növelné a felszín fajhőjét, másrészt pedig a párologtatás során hűtené

is az adott felszínt [Péczy, 1979, 172. o.]. További jelentős szerepe lenne ezen csapadéknak a természetes felszínen kialakuló vegetáció vízellátásában, de a mesterséges felszínek miatt ezen területeken egyáltalán nincs vegetáció.

Mint láthatjuk, a felszínek minőségének rendkívül nagy szerepe van a városi felmelegedés mértékének számottevő növekedésében és a városklíma kialakulásában. Azonban mindezen túl vannak további, igen fontos összetevői a városi felmelegedés kialakulásának. Az egyik ilyen igen fontos tényező a városok hőszennyezése [Probáld, 1974]. Mindez az épületek klimatizálásának, az épületgépészeti eszközök, a közlekedés és a közművek hulladékhőjéből áll elő. Meg kell jegyezni, hogy minél alacsonyabb hatásfokú egy ilyen rendszer, annál magasabb az általa kibocsátott hulladékhő aránya.

Az utolsó, ám nem elhanyagolható tényező a város levegőjébe jutó üvegházhatású gázok és egyéb légszennyező anyagok rendkívül nagy koncentrációban való jelenléte a város feletti légrétegben (füstkupola) [Tiao et al., 1975]. Ezek hőmérsékletre gyakorolt hatása egyrészt az, hogy kis mértékben csökkentik a földfelszínre leérkező rövidhullámú sugárzást, másrészt viszont, ami sokkal jelentősebb hatású, a hosszuhullámú kisugárzást igen jelentős mértékben akadályozzák (üvegházhatás), ami nagymértékben felmelegíti ezt a város feletti légréteget.

Összefoglalva ezek azok a tényezők, amelyek felelősek a városi hősziget jelenség kialakulásáért. Mindezek többé-kevésbé összefüggnek és jellemzően erősítik egymás hatását.

II.3.3. A városi hősziget hatásai

A városi hősziget hatásai igen összetettek, egyrészt hatnak a városlakókra, másrészt a városi energiafogyasztásra, valamint a városi zöldfelület általános állapotára, mindezen keresztül pedig jelentősen hatnak a városi vízfogyasztásra.

Az emberekre gyakorolt hatással kapcsolatban el lehet mondani, hogy a mérsékelt égövön jelentős részén (Magyarországon, Közép-Európában és attól délre) a városi hősziget élettani hatásai egyértelműen negatívak [Mika, 1999]. A nyári időszakban a hőségnapok számának, intenzitásának és gyakoriságának növekedése sokkal magasabb halálozást eredményez a statisztikák szerint, mint a téli hideg hónapok megfagyásos, kihűléses halálesetei [KSH, 2011a], bár tagadhatatlan, hogy a városi hősziget következtében rendkívül lerövidül a mérsékelt égövi városokban a fagyos időszakok hossza [Unger, 2010, 25. o.], aminek az a következménye, hogy a kihűléses halálesetek száma jelentősen csökken. A nyári időszakban, főleg akkor, amikor a makroklimatikus helyzet is erősíti a városi hősziget

kialakulását és hatásának erősödését (pl. 2003-as franciaországi hőhullám [Vandentorren et al., 2004]), akkor a halálozási ráták drasztikus emelkedése tapasztalható, mely a hőhullám megszűntével csaknem ugyanolyan gyorsan vissza is esik. Az ilyen erős élettani hatás oka az emberi hőérzetben és a hősziget jellegében keresendő. Az emberi hőérzetet a meteorológiai hőmérséklet (2 m magasságban az utcaszint felett, árnyékban, szélvédett helyen mért léghőmérséklet [Szász – Tőkei, 1997, 86. o.]) mellett igen nagy mértékben erősíti, hogyha a környező felületeknek magas a hőmérséklete és azokból intenzív hősugárzás történik az ember felé. A városi hősziget esetében a tényleges levegőhőmérséklet emelkedésénél jóval nagyobb a besugárzásnak kitett városi felszínek (elsősorban a mesterséges anyagúak) hőmérsékletének megemelkedése, melyek azután, mint nagyméretű hősugárzó felszínek jelennek meg, főleg a délutáni és esti órákban (mikor a városi hőszigetnek a maximumát érzékeljük pont ezen okból), ugyanakkor pedig az emberi hőérzet ilyenkor sokkal magasabb, mint a tényleges léghőmérséklet [Szász – Tőkei, 1997, 620. o.].

Az élettani hatásokon túl egyéb hátrányai is vannak a városi hőszigetnek. Egyrészt nyári időszakban rendkívül megemelkedik a hűtésre fordított energiafogyasztás (elsősorban a már Magyarországon is rendkívül elterjedt légkondicionáló használata miatt), az utóbbi években ennek köszönhetően a nyári elektromos energia fogyasztás már meghaladta a téli időszakét [Major et al., 2002]. Meglehetősen szerencsétlen módon a légkondicionálók és egyéb gépészeti berendezések használata csak tovább fokozza városi hősziget mértékét, hiszen a hűtő hatásnak az az ára, hogy az épületen kívül jelentős mértékben felmelegítik a levegőt. A magas hőmérsékleten való folyamatos működés az egyéb gépészeti berendezések működését is befolyásolja, élettartamukat jelentősen csökkentheti, a meghibásodás mértékét fokozhatja. Télen van egy kisebb előnye a hőszigetnek, vagyis a magasabb a hőmérséklet valamelyest csökkenti a fűtési energiaigényt. Azonban az épületek anyagának alacsony fajhője, valamint hogy a hősziget jelentős részben pont a fűtésre szánt energia hulladékhőjeként jelenik meg ebben az időszakban, együttesen azt jelenti, hogy ezen előny nem tekinthető igazán jelentősnek (végső soron a nagyobb hősziget intenzitás ez esetben csupán a nagyobb hőszennyezés következménye).

További jelentős hatás éri a zöldfelületeket és a városi vegetációt (valamint egyéb városi élőlényeket is). Mivel a növényzet is él, ezért a magas hőmérséklet azt is károsíthatja, ráadásul nagyon sokféle módon. Az első és legközvetlenebb hatás, ami nem igazán közismert, hogy a Közép-Európában és a mérsékelt égövben honos fajok 35 °C felett megszüntetik a fotoszintézist (itt jellemzően a túlzott kiszáradás ellen védekezik a növény az életfunkciói redukálásával). Léteznek egyes forró égővről származó növények, melyek e fölött a hőmérséklet felett is fotoszintetizálnak, azonban ezek, jellemzően származásuk miatt egyynyári

növények és városi növényzetként nem használják őket (jellemzően szántóföldi növények, pl. Sorghum [Bocz, 1992, 423-426. o.]). A fenti probléma Budapesten évente egy-két hónapig rendszeresen megjelenhet.

További, sokkal jelentősebb probléma a hőszigetnek a növények vízháztartására gyakorolt hatása a nyári hónapokban. A magasabb hőmérséklet intenzívebb párologtatásra készíti a növényeket, amit tovább erősít a mesterséges felületek közvetlen hősugárzása. A problémát tovább súlyosbítja az egyik legjelentősebb hősziget kiváltó hatás, vagyis a csatornázott burkolatok magas területaránya. Ennek következtében a ténylegesen lehulló csapadéknak csak egy töredéke jut be a talajba a növényzet által is felvehető módon. Vagyis a növényeknek úgy kell intenzívebben párologtatniuk, hogy közben sokkal kevesebb vízhez is jutnak. Alföldi jellegű települések esetében (mint amilyen jórészt Budapest is) felmerül még egy probléma. Ilyen városok esetében a fás szárú növényzetnek a lehulló csapadék mellett rendkívül fontos vízforrása a talajvíz is. Az erősen beépített területek esetében, köszönhetően a talajszerkezet radikális átalakulásának, a kultúrrétegnek, az alapozásoknak, esetenként a mélyen a talajba épített infrastruktúrának (pl. metró) a talajvízszint rendkívüli mértékben, akár több 10 méterrel is lesüllyedhet [Foster et al., 1998]. Ennek következménye, hogy a legtöbb növény számára (kivéve talán a kocsányos tölgyet [Jereb, 1979, 43. o.]) a talajvíz megszűnik vízforrásnak lenni, mivel a gyökérzete nem tudja elérni annak jelentősen lesüllyedt szintjét. A városi hőszigetnek egy pozitív hatása lehet a növényzetre, de ott is csak azokra, amelyek eredetileg melegebb éghajlathoz származnak. A jelentősen lerövidült fagyos időszakok miatt a sokkal melegebb éghajlathoz szokott, városon kívül egyértelműen fagyérzékeny növények eredményesen telepíthetők nagyvárosi területeken.

A fentiekből látható, hogy a városi hősziget hatása rendkívül sokrétű. Míg pozitív hatásai igen ritkák és csupán téli időszakban jelentkeznek, addig negatív hatásai rendkívül jelentősek és az év nagy részében érzékelhetők.

II.3.4. A távérzékelés szerepe a felszíni városi hősziget vizsgálatában

A felszíni városi hősziget vizsgálatában az utóbbi évtizedekben a távérzékelés rendkívül nagy jelentőségre tett szert, így mindenképpen szükséges áttekinteni az ilyen típusú vizsgálatok történetét és eddigi eredményeiket.

A műholdas vizsgálatok a városklimatológiai vizsgálatok eszköztárában igazából a nagyfelbontású műholdképek civil életben való megjelenésével váltak lehetővé. Ennek megfelelően az első ilyen vizsgálatok az 1970-es évekre datálhatóak. Ki kell emelni Rao

kutatását [Rao, 1972], melyhez 7,4 km-es felbontású termális infravörös műholdképeket használt. Városi léptékhez képest ez ma már rendkívül durva felbontásnak számít, azonban a vizsgált terület New York - Philadelphia - Baltimore - Washington (az USA keleti parti nagyvárosai) rendkívüli mérete lehetővé tette a városklimatológiai alkalmazást és az ilyen irányú következtetések levonását. Legfontosabb eredménye maga az a tény volt, hogy a városi területek markáns hőmérsékleti anomáliát produkáltak ezeken a felvételeken (vagyis a műholdas felvételek tényleg alkalmasak városklimatológiai vizsgálatokra). Az 1970-es évekből még ki kell emelni Carlsonnak és társainak eredményeit [Carlson et al., 1977], akik már 1 km térbeli felbontóképességű műholdképekkel dolgoztak, melyekkel már az egyes városi területhasználatokra is lehetett következtetéseket levonni.

Az 1970-es évek végére már jelentős számú ilyen irányú vizsgálatot végeztek el, gyakorlatilag az 1 km-es felbontóképességű műholdképeket felhasználva, melynek során vizsgálták a hősziget kiterjedését, maximális intenzitását, illetve annak napi és éves menetét, mindezekhez amerikai városokat használva vizsgálati területként. Érdeemes kiemelni Price munkásságát [Price, 1979], aki már nagyobb felbontású műholdas felvételeket alkalmazva (500 m) megállapította, hogy a műhold által mért felszínhőmérséklet akár 10-15 °C-kal is meghaladhatja a városkörnyék felszínhőmérsékletét, továbbá kimutatta, hogy már egészen kis települések esetén is detektálható a városi hősziget megjelenése.

Vukovich jelentős eredménye [Vukovich, 1983] a városi hősziget napi menetére vonatkozik. Kimutatta, hogy a városi hősziget intenzitás maximuma felszínhőmérsékleti (távérzékelte) adatok esetében a nappali órákban alakul ki, míg a léghőmérsékleti adatok esetében mindez a napnyugta utáni órákra adódik. A kétfajta hőmérséklet ezen eltérését és az abból adódó intenzitásmaximum eltérésének fontosságát más kutatások is megerősítették [Roth et al., 1989].

A következő nagy jelentőségű eredmény az egyéb távérzékelte adatok hasznosíthatóságához kapcsolódott [Gallo et al., 1993a]. Gallo és munkatársai vizsgálták a felszínhőmérséklet a léghőmérséklet és az NDVI [Gallo et al., 1993b] index összefüggését. Ez utóbbi közepes és rövid hullámhosszú infravörös felvételekből származtatott indexértékeloszlás, mely elsősorban a fotoszintetikusan aktív felületek (növénytakaró) vizsgálatánál alkalmazható, azonban városi körülmények között arra jutottak, hogy az NDVI index napi menete sokkal jobban kapcsolható a léghőmérséklet napi menetének változásához a vegetációs időszakban, mint a felszínhőmérsékleti adatok eloszlása [Gallo, 1999]. Jelentős lehet ezen eredmény, mivel így az NDVI indexhez kapcsolódó nagyobb felbontóképesség érhető el ilyen típusú vizsgálatokban, azonban erősen beépített területeken, ahol kicsi a vegetációval borított felület aránya, mindenképpen ellenőrizni kell a módszer

megbízhatóságát (léghőmérsékleti és felszínhőmérsékleti mérésekkel).

Nichol alkalmazta elsőként a Landsat TM műhold 120 m-es térbeli felbontóképességű hőmérsékleti szenzorának adatait, mely az addigiaknál részletesebb elemzést tett lehetővé [Nichol, 1996]. Ugyanazén felvételeket használta később Xian, aki a felszínhőmérséklet és a nem vízáteresztő felszínek közti szoros kapcsolatra mutatott rá [Xian, 2008].

Végezetül meg kell említeni a TERRA műhold MODIS és ASTER szenzorait, melyek segítségével jelentős eredményeket értek el a városi területeknek a Föld éghajlatára történő hatásának megismerésében [Jin et al., 2005], valamint albedó és a városi hősziget összefüggésének vizsgálata is lehetővé vált.

A műholdas vizsgálatok mellett mindeképpen meg kell említenünk a távérzékelésnek egy másik módszerét, a repülőgépről történő felvételezést is. Izraelben, Tel-Avivban végeztek ilyen méréseket [Ben-Dor – Saaroni, 1997], melynek során egy repülőgépre telepített közönséges hőkamerával felvételezték a várost. A módszer előnye a rendkívül jó térbeli felbontóképesség, hátránya a fellépő torzítások problematikája, a mérés időbeli elhúzódása, melyek jelentős utólagos korrelációkat igényelnek. Hasonló kutatás folyt a Szegedi Egyetemen is Unger János és Rakonczai János vezetésével [Unger et al., 2009].

A hazai kutatások közül ki kell emelni továbbá az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén folyó városklíma kutatásokat, melyek jelentős részben műholdas mérésen alapuló városi hőszigetet célzó kutatások. Bartholy Judit, Pongrácz Rita és Dezső Zsuzsa nevét érdemes kiemelni [Bartholy et al., 2009], valamint Dezső Zuzsa PhD értekezését [Dezső, 2009]. Az Országos Meteorológiai Szolgálat szerepe és együttműködése a fent említett kutatóhelyekkel is rendkívül jelentős mindezen vizsgálatok során, hiszen a felszíni léghőmérséklet mérő hálózatuk eredményei alapvető jelentőségűek a távérzékelte adatok feldolgozásakor, valamint a felszínhőmérsékleti és léghőmérsékleti adatok összevetésekor [Bartholy et al., 2009].

A fenti szakirodalmi ismertetés messze nem teljes és még rendkívül hosszan lehetne részletezni az eredményeit, azonban összefoglalva a jelenlegi helyzet elmondhatjuk, hogy a városi hősziget modellezése rendkívül előrehaladott, több kutató is bizonyította a városi hőszigetet kiváltó és befolyásoló tényezőkkel kapcsolatos sejtéseket. A másik jelentős csoportja az eredményeknek kifejezetten a távérzékeléses módszer alkalmazhatóságával kapcsolatos, mindez elősorban az eltérő hőmérséklet típusok (léghőmérséklet és felszínhőmérséklet) összefüggéseit, az azokhoz kapcsolódó és a azokat karakterizálni képes egyéb jellemzőket, illetve ezeknek időbeli eloszlását (napi és éves) menetét illeti. Ugyanakkor ahogy azt több munkában is megállapítják, a városi felszín rendkívül komplex, így nehéz a tényleges összefüggéseket megmérni, az egyes városi "felszínek" és a városi hősziget

szerkezete, de akár a távérzékelt városi felszínhőmérséklet értékei között is. Ahogy a műholdas felvételek térbeli felbontóképessége javul, úgy lehet azonban egyre inkább pontosítani az ilyen irányú ismereteket. A jelenleg elérhető 90 m-es térbeli felbontóképességű távérzékelt felszínhőmérsékleti képek már lehetővé tesznek akár egészen pontos analízist is (természetesen vizsgált területtől függően).

A hazai kutatásokban az ilyen típusú vizsgálatok még viszonylag korai stádiumban vannak, bár az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén folyó kutatásoknak van egy ilyen iránya is, mint ahogy azt Dezső Zsuzsa PhD értekezésének utolsó fejezetében [Dezső, 2009, 96. o.] is láthatjuk. Itt a nagyfelbontású felvételek esettanulmányokként történő kiértékelése során a felszínhőmérsékleti szélsőségek kvalitatív meghatározása és térbeli lokalizációja történt meg, a felszínhőmérsékleti anomália kialakulásáért felelőssé tehető városi objektumokhoz történő hozzárendeléssel. Azonban az ilyen típusú vizsgálatok módszertanának továbbfejlesztése és az új eredmények kiértékelése szükséges ahhoz, hogy döntéstámogatói rendszerként is lehessen alkalmazni, vagyis nem csupán a kialakult városi hősziget szekezetének minél pontosabb megismerése legyen a cél, hanem azon felszintípusok, területhasználati módok meghatározása, melyek jelentős befolyást gyakorolnak (akár pozitív, akár negatív értelemben) a felszínhőmérsékletre és ezen keresztül magára a városi hőmérséklet eloszlásra. Ezen disszertáció célja ezen következtetések levonása, melynek eredményeképpen várostervezési, városépítészeti és akár építészeti hasznosítása is lehetővé válik az ilyen típusú vizsgálati eredményeknek.

III. VIZSGÁLATI MÓDSZER

A vizsgálati módszer műholdas felvételezéssel készült adatbázis elemzésen alapult. A műholdas felvételezésnek olyan előnyei vannak, melyek semmilyen más módszerrel nem érhetők el. Ugyanakkor van néhány hátránya is, melyeknek kiküszöbölése olykor jelentős nehézségeket okoz.

A vizsgálat menete a következő: elsőként a beszerzett műholdas adatokat dolgoztam fel. A feldolgozás egyik fontos eleme a hőmérsékleti mező szerkezetének vizsgálata, a másik pedig az egyéb felszíni, elsősorban hőmérsékleti meteorológiai adatokkal való összehasonlítás. A feldolgozás következő lépése a hőmérsékleti mező szerkezetének összevetése a területhasználati módokkal, melyeket a településrendezési tervek területhasználati tervlapjai tartalmaznak [OTÉK, 1997]. A területhasználati besorolás nem feltétlenül ad magyarázatot minden esetben a hősziget térbeli szerkezetének kialakulására, ezért adott esetben használni kell hagyományos légifotókat [Székely, 2001], valamint a Google Earth felvételeit is [<http://maps.google.hu> megnyitva 2012.03.25-én]. A légifotók és az űrfelvételek jellemzően nem naprakészek és az adott felszínborítást városok esetében rendkívül gyorsan meg lehet változtatni, valamint nagyon sok mindent nem lehet felfedezni légifotóról, amely pedig jelentős hatással lehet a városi hőszigetre (Például az adott ipari területen történik-e valamilyen ipari folyamat, vagy nem. Mindez légifotó alapján eldönthetetlen, azonban a városi hősziget szerkezetét lokálisan rendkívül jelentősen befolyásolhatja. Jellemzően ilyesminek az eldöntésére pont az infravörös felvételeket használják katonai alkalmazás esetén). Így adott esetben, mikor olyan hőmérsékleti anomáliával szembesülünk, mely a légifotók, Google Earth felvételek, illetve területhasználati térképlapok alapján nem indokolható, a vizsgálandó terület helyszíni bejárása elengedhetetlen. A fenti vizsgálatok és elemzések eredményei alapján lehet következtetéseket levonni a városi hősziget és a területhasználat összefüggéseiről.

A továbbiakban a fent ismertetett vizsgálati folyamat elemeit mutatom be részletesen.

III.1. A műholdas felvételezés szerepe a városi hősziget vizsgálatában

Mint a vizsgálati rész bevezetésében említettük, a műholdas felvételezés a városi hősziget vizsgálatában alapvető fontosságú. A városi hősziget elemzésére alkalmas műholdképek az ún. termális infravörös műholdképek, melyek alapvetően a hosszú

hullámhosszú infravörös spektrumtartományban (melyet közönségesen hősugárzásnak lehet nevezni) készült felvételeket jelentik [Fuchs – Tanner, 1966].

A műholdképek vitathatatlan előnye, mely nélkülözhetetlenné teszi használatukat, az az, hogy egy adott időpillanatban a teljes vizsgált területről (esetünkben a vizsgált városról, Budapestről) szolgáltatnak adatokat, mely semmilyen más módszerrel, még légifelvételéssel sem válik lehetségessé, bár ott bizonyos korrekciós eljárások alkalmazásával kaphatnánk közelítő eredményt [Unger et al., 2009]. Elméletileg van lehetőség felszíni mérésekkel is eredményeket elérni, azonban azok információsűrűsége jelentősen kisebb. A vizsgált területünkön, Budapesten 4 db teljes teljes felszereltségű meteorológiai mérőállomás található, mely azt jelenti, hogy 525 km²-re jut 4 db mérési pont. Összevetve mindezt az elérhető termális infravörös műholdképekkel, ott még a rosszabb térbeli felbontóképességűek [<http://modis-land.gsfc.nasa.gov/temp.html> megnyitva 2012.03.25-én] (1 km) is 525 db hőmérsékleti adatot eredményeznek Budapest területére (6. kép). Ezzel szemben a jobb felbontóképességűek [ASTER, 2001], melyekről a későbbiekben részletesen szó lesz, és melyek térbeli felbontóképessége 90 m, mintegy 65000 hőmérséklet értéket jelent a város területéről egy adott időpillanatban. Mindezen adatsűrűséget, mely alapján a hőmérsékleti mező meglehetősen jól modellezhető, nem lehet felszíni mérőállomás hálózattal helyettesíteni. 65000 meteorológiai mérőállomás telepítése Budapesten, de bármely más nagyvárosban is, gazdaságilag megvalósíthatatlan. Amennyiben néhány éven belül felbocsátanak egy még érzékenyebb szenzorral rendelkező műholdat, akkor a műholdas adatbázis adatmennyisége ismét egy nagyságrenddel lenne nagyobb a fentebb leírtnál [ASTER, 2001]. Figyelembe véve továbbá a már alkalmazott repülőgépes hőmérsékleti felvételek térbeli felbontóképességét (~1,5-2 m) a felszíni mérőállomás-hálózat sűrítés mint alternatíva egyáltalán nem vehető figyelembe (és nem is lehet cél, hiszen például a felszíni állomások eleve másmilyen típusú hőmérséklet adatokat mérnek, időben akár folyamatosan, vagyis "másra jók"). További oka ennek, hogy a műholdas felvételezés terén további nagy ütemű fejlődés várható, a katonai technológia polgári célú alkalmazásának köszönhetően [Richelson, 1990].

A műholdfelvételek fent említett vitathatatlan előnyük mellett jelentős hiányosságokkal is rendelkeznek. Míg a térbeli felbontás és adatsűrűség miatt a vizsgálatokhoz ma már nélkülözhetetlenek, addig az időbeli változások vizsgálatánál egyértelműen a felszíni mérőállomások vannak előnyben, melyek akár folytonos meteorológiai adatsorokat is képesek produkálni. A műholdképek esetében viszont a műholdak pályajellemzői miatt az adatmennyiség rendkívül limitált. Olyan műholdak esetében, melyek képesek több évig megbízhatóan működni, a keringési idő több óra, és ezen

idő alatt egy adott területről naponta csupán egy (esetleg két) felvételt képesek készíteni. A megoldás viszonylag egyszerű, azonban rendkívül költséges és így csak katonai alkalmazásoknál kerül rá sor. Alapvetően nagyobb számú műhold alkalmazásáról van szó, melyek a megfelelő orbitális pályákon keringenek úgy, hogy csaknem állandó lefedettséget biztosítsanak egy adott területre.

Kisebb probléma, hogy a hősziget térbeli jellege a műholdfelvételek esetében csupán területi jelleget jelenthet, hiszen a műholdas szenzor csupán a felszín kisugárzását képes érzékelni, így a hősziget függőleges kiterjedtségéről és annak intenzitásáról nem tud információt szolgáltatni.

Az előzőhöz szorosan kapcsolódó probléma magának a hőmérsékletnek a definíciója. A léghőmérséklet a definíció szerint 2 m magasságban, árnyékban, légmozgástól védett helyen mért hőmérséklet. A műhold által szolgáltatott hőmérséklet ún. kinetikus felszínhőmérséklet, amely alapvetően nem más, mint a műholdas szenzor különböző spektrális csatornáin mért sugárzási értékekből egy meghatározott algoritmus szerint származtatott, korrigált hőmérséklet dimenziójú érték [ASTER, 2001]. Természetesen az algoritmus és a csatornák figyelembevétele úgy lett meghatározva, hogy az így kapott hőmérséklet dimenziójú érték és az adott felszín tényleges hőmérséklete a lehető legnagyobb korrelációban legyen egymással. Azonban egyrészt minden időjárási zavaró tényezőt nem lehet teljes mértékben kikorrigálni, másrészt pedig az adott felszín tényleges hőmérséklete, főleg amennyiben az közvetlen besugárzásnak van kitéve, vagy pedig egy alulról fűtött felszínről van szó, jelentős mértékben eltérhet az ugyanazon felszín felett mérhető léghőmérséklettől.

A jelenleg működő meteorológiai műholdak esetében az időbeli felbontóképesség még inkább behatárolt, a kutatásom során elérhető, legsűrűbben felvételező műholdak (2 db) [NASA, 1999] naponta egyszer haladnak át ugyanazon földrajzi pont felett, így egy adott helyről napi maximum két felvétel áll rendelkezésre. Mindez azt jelenti, hogy az időjárás, és ami a mi szempontunkból fontos, a városi hősziget napi menete nem mérhető műholdas felvételek használatával. A napi két felvétel ugyanakkor alkalmas arra, hogy a városi hősziget éves menetéről pontos ismeretekre tegyünk szert [Dezső, 2009]. A nagyobb felbontású műholdképek esetében pedig, mint a későbbiekben látni fogjuk, jellemzően nincs szó rendszeres felvételezésről, hanem a szenzor csupán esetenként, megrendelésre készít felvételeket [NASA, 1999], amelyek így csak esettanulmányok készítésére alkalmasak [Dezső, 2009].

Még egy rendkívül jelentős hátránya van a műholdképeknek a hőmérsékleti vizsgálatok szempontjából, ez pedig az, hogy nem alkalmazhatóak minden időjárási

körülmény között. Elsősorban a felhőborítottság az, amely megakadályozza a műholdas felvételezés lehetőségét, hiszen ilyen esetben (hasonlóan a látható fény tartományában működő szenzorokhoz, kamerákhoz) a műholdkép csupán a felhő felszínének hőmérsékletéről tud információt szolgáltatni, ilyen időjárási helyzetekben a felszínről információk nem nyerhetők. Mindez azt jelenti, hogy a városi hőszigetéről csak bizonyos speciális (felhőmentes, anticiklonális) időjárási körülmények között kaphatunk információt, aminek két következménye van. Az egyik, hogy a műholdképek segítségével nem lehetséges a városi hősziget és a makroszinoptikus hatások vizsgálata (pl. hogy a különböző mértékű besugárzás esetén milyen mértékű a városi hősziget kialakulása, kiterjedése és intenzitásának mértéke). A másik hozadéka viszont, amely gyakorlati szempontból kifejezetten hasznos, hogy pont azon makroklimatikus időjárási viszonyok mellett tudjuk vizsgálni műholdas felvételek segítségével a városi hőszigetet, melyek legkedvezőbbek annak kialakulására. Vagyis a legerősebb hősziget jelenségeket tudjuk vizsgálni, amelyek az előrejelzés (legrosszabbra való felkészülés), az emberekre gyakorolt legerősebb várható hatás szempontjából a legfontosabb vizsgálandó anomáliák.

Amint az eddigiekből láthatjuk, a műholdas felvételezésnek vannak jelentős hátrányai, azonban a városi hősziget területi kiterjedéséről csupán ezen módszerrel tudunk érdemi információt szerezni, mely jelen kutatáshoz nélkülözhetetlen adatforrás.

III.2. Az ASTER szenzor és az általa készített hőmérsékleti infravörös felvételek bemutatása

Jelen kutatás legfontosabb, alapvető adatforrásai hosszú hullámhosszú (termális) infravörös műholdas felvételek voltak. A következőkben bemutatom az ezen felvételeket készítő szenzorokat és műholdakat, valamint röviden írok a segítségükkel létrehozott adatbázisokról.

A NASA [<http://www.nasa.gov/> megnyitva 2012.03.25-én] Föld Megfigyelő Rendszer (EOS [<http://eos.nasa.gov/> megnyitva 2012.03.25-én]) fejlesztésének egyik fontos eleme volt a Terra (EOS AM-1) műhold felbocsátása 1999 decemberében. Nem egészen 3 év múlva ezt követte a testvér műhold, az Aqua (EOS PM) pályára állítása 2002 májusában. Ezen műholdak adatgyűjtésének célja a globális környezeti változások minél részletesebb vizsgálhatóságának lehetővé tétele volt. Egyik igen jelentős rész cél az antropogén tevékenység éghajlatra gyakorolt hatásának vizsgálata volt.

Néhány alapvető adat a műholdakról [NASA, 1999; Aqua, 2002]: mind a Terra, mind pedig az Aqua kvázipoláris pályájú műholdak, melyek átlagosan 705 km magasságban

keringenek napszinkron pályán. A Földet naponta 16-szor kerülnek meg, pályasíkjuk inklinációja (az Egyenlítő síkjától való elhajlása) 98° . A Terra műhold 5 műszert hordoz a fedélzetén [NASA, 1999], melyekből mi az ASTER nevű szenzor felvételeit használtuk fel a vizsgálataink során. Mindezen adatok az LP DAAC [<http://lpdaac.usgs.gov> megnyitva 2012.03.25-én] nevű adatközponton keresztül érhetőek el.

Az ASTER [ASTER, 2001] szenzor 4 látható és közeli infravörös tartományú felvételezési csatornában 15 m-es térbeli felbontású, 6 rövid hullámhosszú infravörös tartományú felvételezési csatornában 30 m-es térbeli felbontású, valamint 5 hőmérsékleti (termális) infravörös tartományú felvételezési csatornában pedig 90 m-es térbeli felbontású képeket készít. Esetünkben a 90 m-es felbontású termális infravörös felvételeket használtuk. Ezen csatornák hullámhossztartományai: 8,125-8,475 μm , 8,475-8,825 μm , 8,925-9,275 μm , 10,25-10,95 μm és 10,95-11,65 μm . Fontos megjegyeznünk, hogy a felszínhőmérséklet műholdas mérésekből történő meghatározása nem tehető meg egzakt módon olyan esetekben, mikor nem ismerjük a pontos emisszivitást. A probléma megoldására dolgozták ki a "Temperature/Emissivity Separation" (TES) [Gillespie et al., 1999] algoritmust, mely különböző numerikus közelítő algoritmusok kombinálásával határozza meg az ismeretlen változókat. Mindennek eredményeképpen a felszínhőmérséklet mégis viszonylag pontosan meghatározható az ASTER szenzor esetében. A mért felszínhőmérséklet abszolút, illetve relatív pontossága így 1 K ($^\circ\text{C}$) illetve 0,3 K ($^\circ\text{C}$) [ASTER, 2001].

III.2.1. A alkalmazott felvételek felbontóképességének előnyei és korlátai

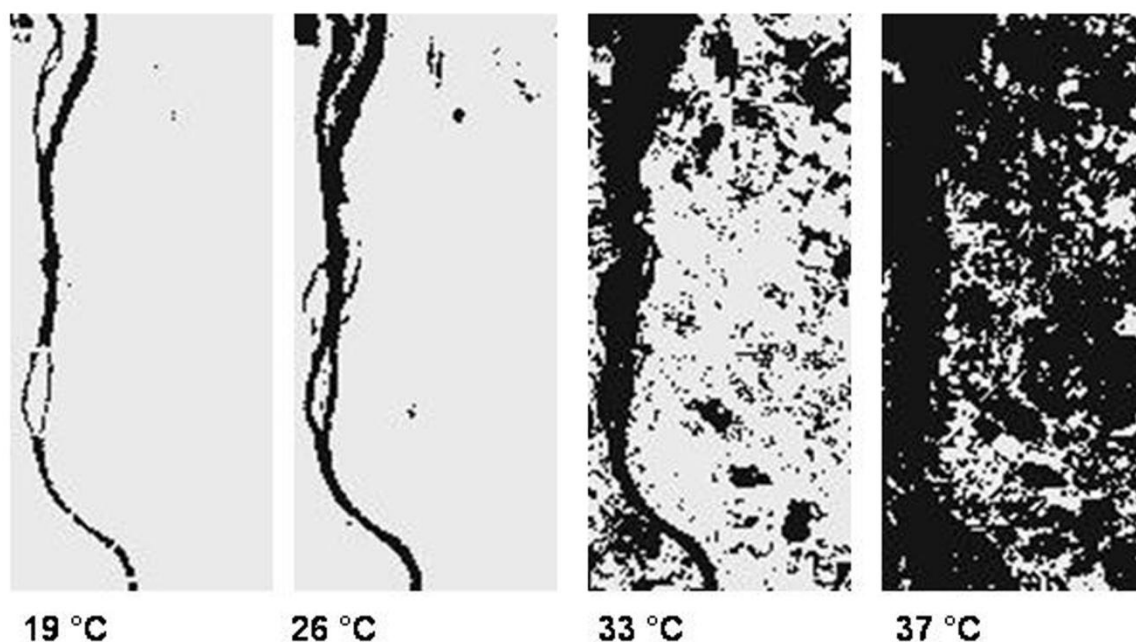
Mint említettük, az általunk használt termális infravörös felvételek térbeli felbontóképessége 90 m. Mivel az ASTER szenzor csatornái közül ezek érzékelik a legnagyobb hullámhosszú sugárzást, így logikus, hogy ezeknek a legrosszabb a felbontóképessége [Conrady – Kingslake, 1992].

Mindazonáltal meteorológiai szempontból ez a 90 m-es felbontás igen jónak minősül, összevetve más egyéb, meteorológiában használatos felvételek, például a szintén az említett műholdakon található MODIS [NASA, 1999] szenzorokkal, melyek térbeli felbontóképessége hőmérsékleti infravörös felvételek esetében 1 km. Várostervezési szempontból azonban még így is kívánnivalót hagy maga után, bár tagadhatatlan, hogy a többi elérhető termális infravörös felvétel típusnál egy nagyságrenddel finomabb térbeli felbontóképesség sokkal több információt hordoz a városi hősziget finomszerkezetéről, legalábbis a felszínhőmérsékletek tekintetében.

Budapest esetében a 90 m-es térbeli felbontás egy tömörszintű analízist tesz lehetővé. Egy városi tömb mérete nagyjából 1 hektár (100 x 100 m), mely durván egy pixelnek felel meg az általunk használt felvételeken. Ennek megfelelően a homogén beépítésű területek, nagy méretű (több tízezer négyzetméteres) ipari, illetve kereskedelmi épületek (pályaúdvartok, ipari csarnokok, bevásárlóközpontok), nagy kiterjedésű homogén zöldfelületek (városi parkok, erdők), illetve nagyobb leburkolt felületek (pl. a Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtér kifutópályái) jól elemezhetőek az ilyen típusú felvételek segítségével.

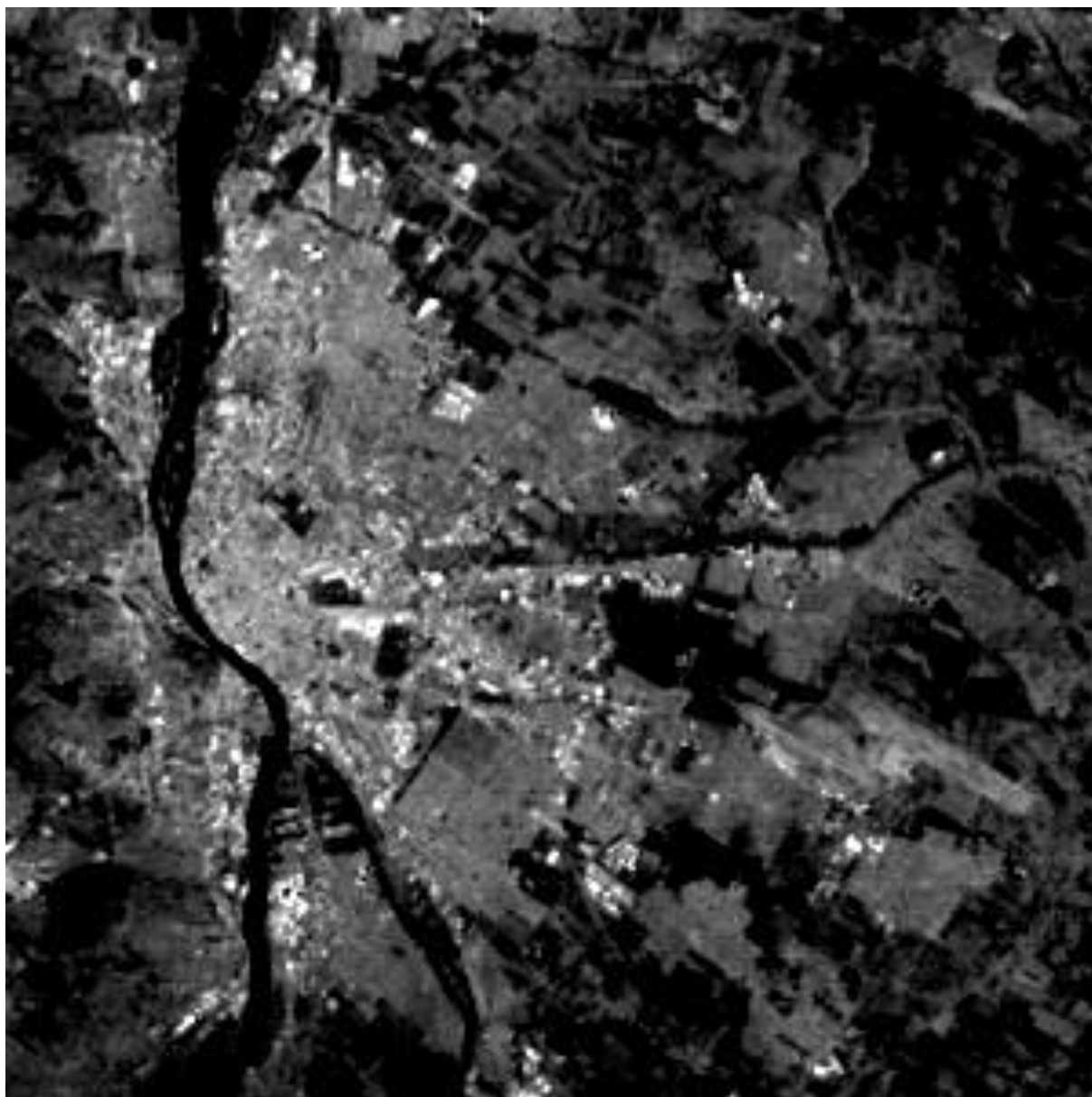
Ami várostervezési szempontból jelentős hátrány, hogy a vonalas létesítmények kvantitatív elemzése ezen felvételek alapján egyáltalán nem lehetséges. Gondolni kell itt elsősorban közlekedési területekre, utakra, vasutakra, melyeknek köztudottan rendkívül jelentős melegítő hatással bírnak a környezetükre, mivel a hőszigetet okozó jelenségek mindegyike (erősen lecsökkentett albedó, mesterséges felületek, fokozott hőszennyezés és fokozott üvegházhatású gáz-kibocsátás) jelen van az ilyen területek esetében. A hatályos magyar szabályozás [OTÉK, 1997] szerint a legszélesebb vonalas közlekedési létesítmények, az autópályák teljes szélessége (kerítéstől kerítésig) 60 m, mely jellemzően zöldfelületeket, vagy legalábbis nem burkolt felületeket is tartalmaz, maga a leburkolt rész csupán 20-40 m széles. Mindennek az elemzésére tehát a 90 m-es térbeli felbontású felvételek nem alkalmasak.

A fentiek dacára azonban Budapest vizsgálata során mégis lehetett két kivételt találni, melyek információval tudtak szolgálni ilyen vonalas objektumokról. Az egyik, nagyon markáns példa a Duna-hidak kirajzolódása volt a folyó felett. Ezen hidak átlagos szélessége csupán 40 m, így elvileg nem láthatóak ezeken a felvételeken, ennek ellenére azonban tisztán kirajzolódnak a műholdképeken. Ennek oka a kétfajta felület (hídburkolat és víz) rendkívül eltérő hőmérsékletében keresendő. Mint majd később látni fogjuk, a városban a Duna vize a leghűvösebb, míg a teljes mértékben leburkolt felületek (mint a hidak is) a legmelegebbek közé tartoznak nyári és tavaszi időszakban. A magyarázata így a jelenségnek az, hogy az adott pixel nem a hidak eltérő hőmérsékletét, hanem a híd adott szakaszának, valamint a mellette levő vízfelület-darabnak valamilyen véletlenszerű (függően attól, hogy az adott pixelnek mekkora részét töltötte ki a híd felülete) hőmérsékleti átlagát adja és ezen átlag is jelentősen magasabb, mint a vízfelület hőmérséklete, így lehetséges, hogy a hidak nyomvonala kirajzolódik ezeken a felvételeken 19 °C-os küszöbértéknél (8. kép). Fontos megjegyezni, hogy pont ez az a véletlenszerű hőmérsékleti átlag, mely ebben az esetben nem teszi lehetővé a kvantitatív vizsgálatot (tehát a felvételek alapján nem lehet megmondani, hogy a hidak felülete mennyire volt felmelegedve a felvétel készítésének pillanatában).



8. kép: A képen Budapest 2001.07.06-án készült műholdfelvétélből készített képsorozat jellegzetes elemei láthatóak. Mind a négy kép jellemzett egy-egy hőmérsékleti értékkel, hőmérsékleti küszöb értékekkel (lásd III.2.4). A világos felületek az adott küszöb hőmérsékletnél magasabb, míg a sötét felületek az annál alacsonyabb felszínhőmérsékletű területeket reprezentálják. Az első képen (19 °C) a Duna hídjai tisztán kivehetők.

A másik ilyen markáns példa pedig az M0-ás autótút nyomvonalának kirajzolódása. Ez esetben lehet számolni a 60 m-es szabályozásban szereplő autópálya szélességgel, azonban itt is fontos megemlíteni, hogy egy 2x2 sávos autótút körgyűrűről van szó, amelyhez hozzá kell számolni a padkákat és a középső elválasztó sáv szélességét, amely átlagosan mintegy 30 m széles, teljesen leburkolt területet jelent. E vonalas létesítmény, az M0-ás körgyűrű nyomvonala is megjelenik azonban a termális infravörös műholdas felvételeken (9. kép). A magyarázat itt is hasonló, mint az előző esetben, vagyis olyan nagy az autópálya melletti területek és az autópálya burkolatának hőmérséklet-különbsége, hogy az adott, autópályafelületet is tartalmazó pixelek esetében egy véletlenszerű átlag hőmérséklet jelenik meg, melynek jóval nagyobb a hőmérsékleti értéke, mint a környező, tisztán zöldfelületeket reprezentáló pixeleknek. Fontos megjegyeznünk, hogy az M0-ás körgyűrű útvonalvezetése olyan, hogy jórészt beépítetlen, mezőgazdasági és erdőterületeken vezet keresztül, melyek jellemzően szintén a hűvösebb városi felületek közé tartoznak, mint ahogyan az a későbbiekben az eredményeinkből is ki fog tűnni.



9. kép: ASTER termális infravörös felvétel Budapestről (2008.05.06). Ez esetben a felszínhőmérsékleti adatok a legegyszerűbb módon vannak ábrázolva, szürkeárnyalatos skálával, vagyis minél melegebb egy terület, annál világosabb és minél hűvösebb, annál sötétebb. A felső részen az M0-ás autópálya északkeleti szakasza vékony, világos (meleg), hullámzó vonalként jelenik meg.

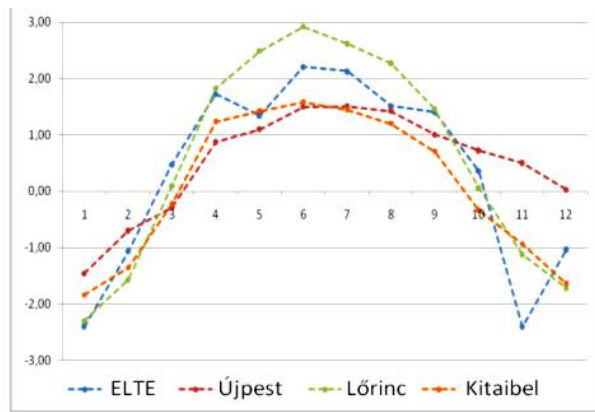
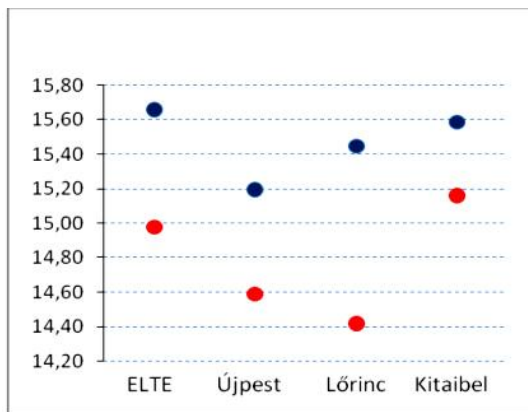
A felbontóképesség továbbá (néhány kivételes esettől eltekintve) nem teszi lehetővé olyan vizsgálatok lefolytatását, melyek érdemi hatást gyakorolhatnának napjaink építészeti tervezésére, tehát az, hogy az épületek milyen klimatikus hatást okoznak a közvetlen környezetükben (ami végső soron magának a városklímának a kialakulásáért legnagyobb mértékben felelős) ezen műholdképek segítségével nem vizsgálható az esetek túlnyomó többségében. Ugyanúgy nem lehetséges a növényzet hatásának a felmérése, csupán nagy kiterjedésű homogén állományok esetében. Azonban ilyen típusú vizsgálatokat kézikamerás,

illetve repülőgépes infravörös felvételezés segítségével [Unger et al., 2009], [Ben-Dor – Saaroni, 1997] lehet végezni, illetve nagyobb épületek, illetve homogén zöldfelületek esetében az ASTER termális infravörös műholdképek segítségével is eredményeket lehet elérni, melyek azután, a szükséges megkötésekkel, általánosíthatóak az egyébként nagyobb felbontóképességet igénylő területekre.

III.2.2. A műholdas felvételeken szereplő hőmérséklet és a standard meteorológiai hőmérséklet összevetése.

Amint azt a korábbiakban is említettem, az ASTER termális infravörös műholdképek ún. kinetikus felszínhőmérsékleti értékeket adnak, tehát az említett 5 különböző, távoli (hőmérsékleti) infravörös sugárzást érzékelő csatorna adataiból, a meghatározott algoritmusok szerint kalkulálnak egy hőmérsékleti értéket. Mint arról a korábbiakban is szó volt, ezen értékek eltérése a tényleges hőmérséklettől abszolút értelemben 1 K, míg relatív értelemben 0,3 K. Azonban ezek az eltérések az adott felszín tényleges hőmérsékleteire vonatkoznak, míg a meteorológiai hőmérséklet definíciója szerint 2 m magasan, árnyékban, szélcsendben mért léghőmérséklet.

A léghőmérséklet és az ASTER szenzor által származtatott kinetikus felszínhőmérséklet pontos összefüggése Budapest esetében nem adható meg egzakt módon, mivel összesen négy teljes meteorológiai állomás léghőmérsékleti adatai alapján lehet kalkulálni őket. Ezen négy állomás a dél-keleten elhelyezkedő Pestszentlőrincen (XVIII. kerület), az ELTE Természettudományi Karán, Lágymányoson (XI. kerület), Újpesten (IV. kerület), valamint a Kitaibel Pál utcában, az Országos Meteorológiai Szolgálat székházánál (II. kerület) található. Ezek közül a Pestszentlőrinci jellemzően külvárosi, a Lágymányosi és az Újpesti esetében a Duna helyi klímamódosító hatása érvényesül, míg a Kitaibel Pál utcai mérőállomás esetében a mért adatokat bizonyos helyi körülmények feltételezhetően erősen befolyásolják. Mindazonáltal MODIS [NASA, 1999] termális infravörös műholdképek és a felszíni hőmérsékleti adatok összevetéséből készült egy tanulmány 2009-ben [Dobi et al., 2009], melynek eredménye az, hogy az átlagos kinetikus felszínhőmérséklet és a átlagos standard meteorológiai hőmérséklet közötti eltérés havi átlaghőmérsékletek esetében sosem nagyobb 3 K-nál, míg éves átlagok esetében jellemzően maximum 1-1,5 K (5. diagram).



5. diagram: A MODIS felszínhőmérséklet és a felszíni mérőállomások adatainak kapcsolata. A bal oldalon az éves átlaghőmérsékletek összevetése látható (késsel a műholdas, pirossal a felszíni mérőállomások adatai). A jobb oldalon a havi átlagok összevetése látható az év (2008) 12 hónapjában, a grafikonok a műholdas adatok és a mérőállomások adatainak eltérését mutatják [Dobi et al., 2009].

A városi hősziget, illetve különböző típusú hőmérsékletek kapcsán mindenképpen meg kell említenünk az érzet hőmérsékletet (hőérzet), mely az ember által érzékelt hőmérséklet, ami általában eltér a standard meteorológiai hőmérséklettől, és jellemzően olyan tényezők befolyásolják, mint relatív légnedvesség tartalom, szélsébség, illetve az adott területen fennálló sugárzási viszonyok. A városklíma jellemzői, vagyis a szélsébség és a relatív légnedvesség-csökkenés, valamint a nagyszámú mesterséges felszín, melyek jelentős hőszugárzó felületként jelennek meg, mind azt eredményezik, hogy a városi hősziget a tényleges hőmérséklet-emelkedésnél sokkal nagyobb mértékben képes megemlíteni a hőérzetet. A kinetikus felszínhőmérséklet is hasonlóan magasabb értékeket mutat a standard meteorológiai hőmérséklethez képest anticiklonális, erős hőszigetnek kedvező makroklimatikus időszakokban.

III.2.3. Az esettanulmányok jelentősége, alkalmazásának korlátai a városi hősziget vizsgálatánál

A felhasznált ASTER műholdképeknek megvan az a hátrányuk a többi, kevésbé jó térbeli felbontású műholdképhez (pl. MODIS) képest, hogy csupán esetenként, megrendelésre [ASTER, 2001], készült felvételek, így többéves, napi vagy heti rendszerességgel készített adatsorok helyett csupán évi néhány felvétel készül, mely csak esettanulmányok elemzésére ad lehetőséget.

Azonban a mi szempontunkból az ilyen esettanulmányok is teljes értékű adatforrásnak tekinthetők, hiszen elsősorban nem meteorológiai jellegű, hanem városi beépítésre vonatkozó információkat akarunk szerezni és abból következtéseket levonni. A használható ASTER felvételek Budapestről felhőmentes, anticiklonális időszakban készültek, mely kedvezett a városi hősziget minél erősebb kifejlődésének. Ugyanakkor azonban ez az egy speciális makroszinoptikus helyzet az, amikor a városi hősziget maximálisan képes kifejlődni, tehát ez esetben nagyon jól detektálhatóak a szélsőségek, valamint ilyen esetben lehet legjobban felmérni, hogy a városi hősziget térbeli szerkezete és maga a városszerkezet között milyen összefüggések vannak.

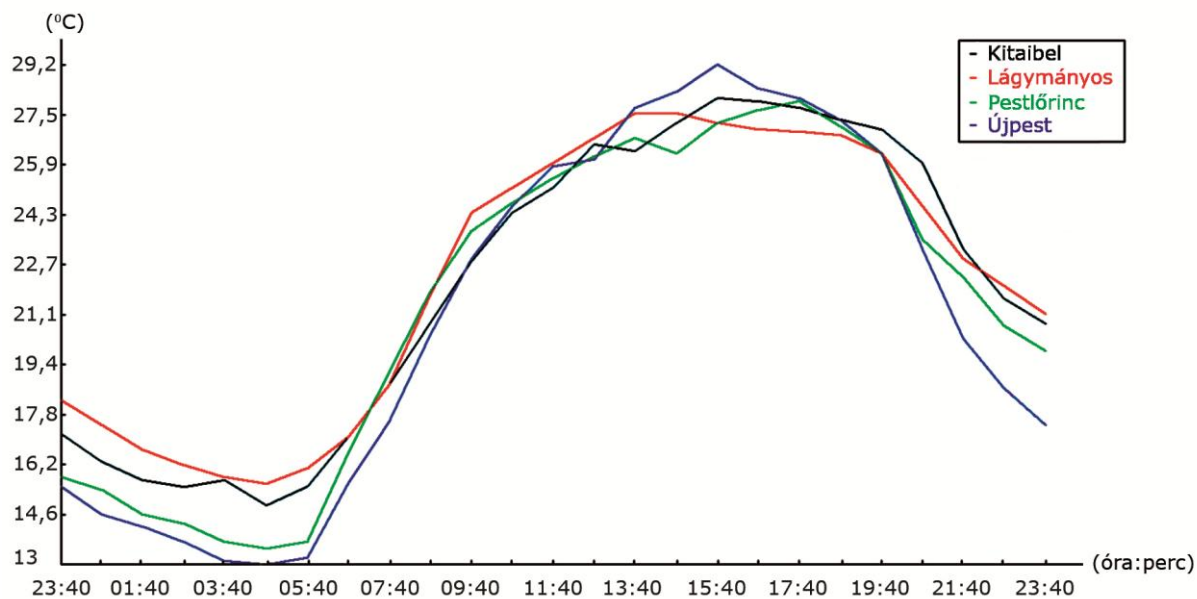
Így, mivel a célunk az, hogy megállapítsuk, hogy a város tulajdonságai (szerkezete, anyagai, beépítése stb.) milyen hatással vannak a városi hőszigetre, esetünkben ezen meteorológiai értelemben specializált helyzetben történő esettanulmány jellegű vizsgálatok a legideálisabbak és ilyen szempontok mentén teljeskörű elemzést tesznek lehetővé. Ugyanakkor nem hagyhatjuk figyelmen kívül azt a tényt, hogy magának a városi hőszigetnek, mint meteorológiai jelenségnek a teljeskörű vizsgálatához csupán az ilyen jellegű esettanulmányok nem szolgálnak kellő mennyiségű információval [Unger, 2010, 76 o.].

III.2.4. A kiválasztott műholdfelvételek napjainak meteorológiai elemzése

Összesen 5 ASTER műholdképet elemeztünk, ezek készítésének időpontjai: 2001. július. 6.; 2002. május 4.; 2003 február 2.; 2006 június 18.; 2008 május 6. Gyakorlatilag 4 felvétel készült késő tavaszi és nyári időszakban és csupán egy a téli felvétel. Ennek oka amellet, hogy a városi hősziget negatív hatásai elsősorban nyári időszakban fejtik ki hatásukat (így ezen időszakban érdemes vizsgálni szerkezetüket), az hogy Budapest esetében sokkal nagyobb a valószínűsége a téli felhőborítottságnak, így a NASA adatbázisában szereplő mintegy 30 kép közül a 2001-2008-as időszakban gyakorlatilag a 2003. február 2-ai kép volt az egyetlen igazán jól használható téli kép a fővárosról.

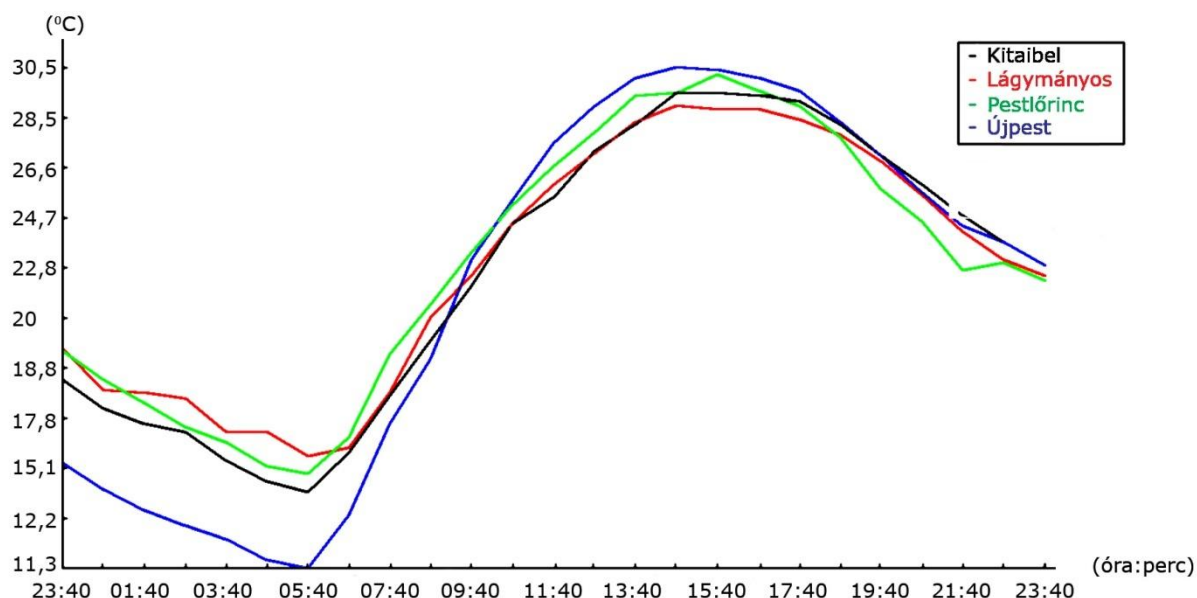
Az adott napok a következőképpen jellemezhetők meteorológiai szempontból Budapest esetében a budapesti mérőállomások adatait figyelembe véve:

2001. július 6.: napos, derült idő volt, a napsütéses órák száma a belterületi mérőállomás (Kitaibel Pál utca) adatai szerint 12 óra, a külvárosi állomás (Pestlőrinc) adatai szerint 13 óra volt. A léghőmérséklet napi menete a mérőállomásokon a 6. diagram szerint alakult. A minimum és a maximum hőmérsékleti értékeket aznap egyaránt az Újpesti mérőállomáson mérték, 29,2 °C-ot, illetve 13 °C-ot.



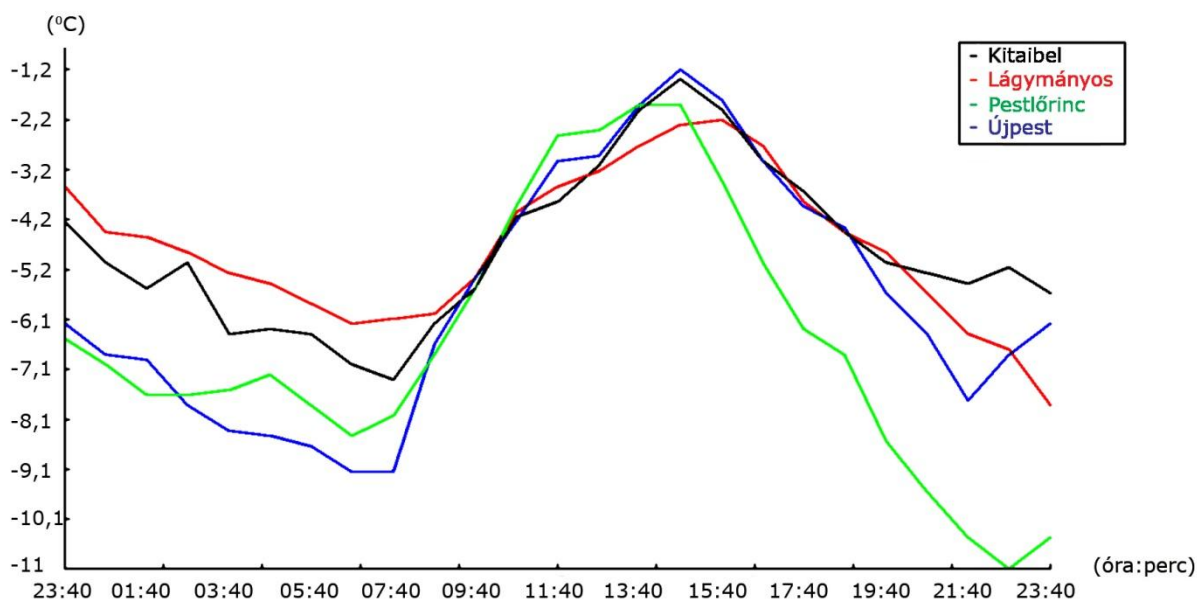
6. diagram: *A léghőmérséklet napi menete (óránként mérve) a négy budapesti mérőállomáson 2001 július 6-án [adatforrás: Országos Meteorológiai Szolgálat].*

2002 május 4.: Derült napos idő volt, a napsütéses órák száma a Pestlőrinci állomás adata szerint 13 óra volt, a belterületi állomásról sajnos nem kaptam adatot. A léghőmérséklet napi menete a 7. diagram szerint alakult. A napi maximum, illetve minimum hőmérsékletet ismét az újpesti mérőállomáson mérték, 30,5 °C-ot, illetve 11,3 °C-ot.



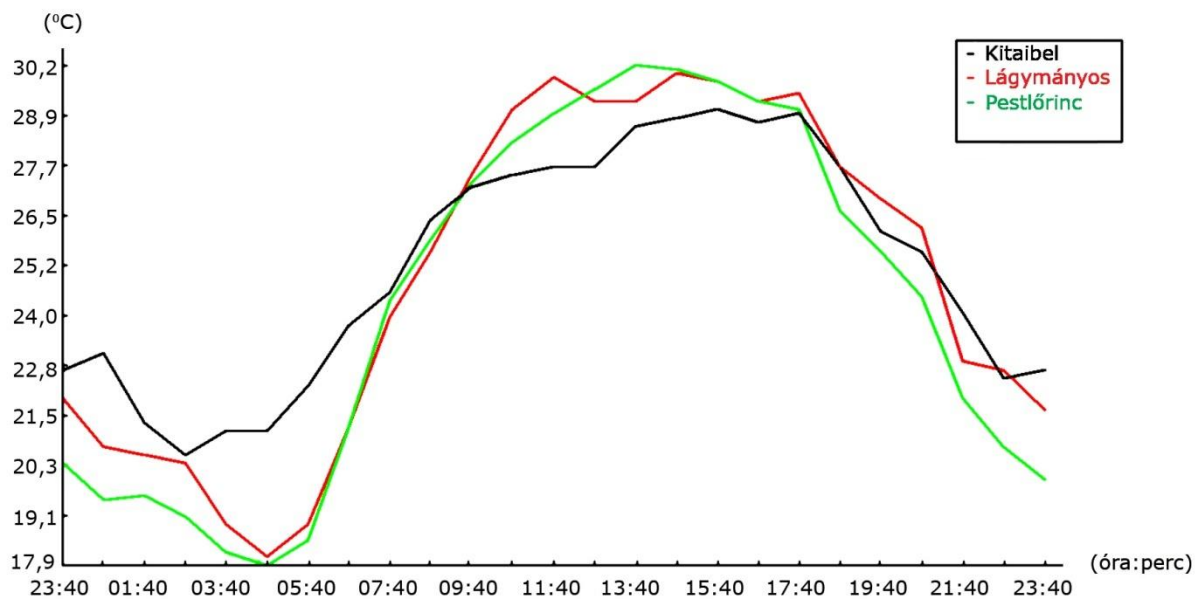
7. diagram: *A léghőmérséklet napi menete (óránként mérve) a négy budapesti mérőállomáson 2002 május 4-én [adatforrás: Országos Meteorológiai Szolgálat].*

2003 február 2.: Az egyetlen téli felvétel, aznap a napsütéses órák száma mind a belterületi, mind a külterületi állomás adatai szerint 8 óra volt, ami egy derűs téli napnak számít. A léghőmérséklet napi menete a 8. diagram szerint alakult. A napi maximumhőmérsékletet ezúttal is az újpesti mérőállomáson mérték, $-1,2^{\circ}\text{C}$ -ot, azonban minimum ezúttal Pestlőrincen született -11°C .



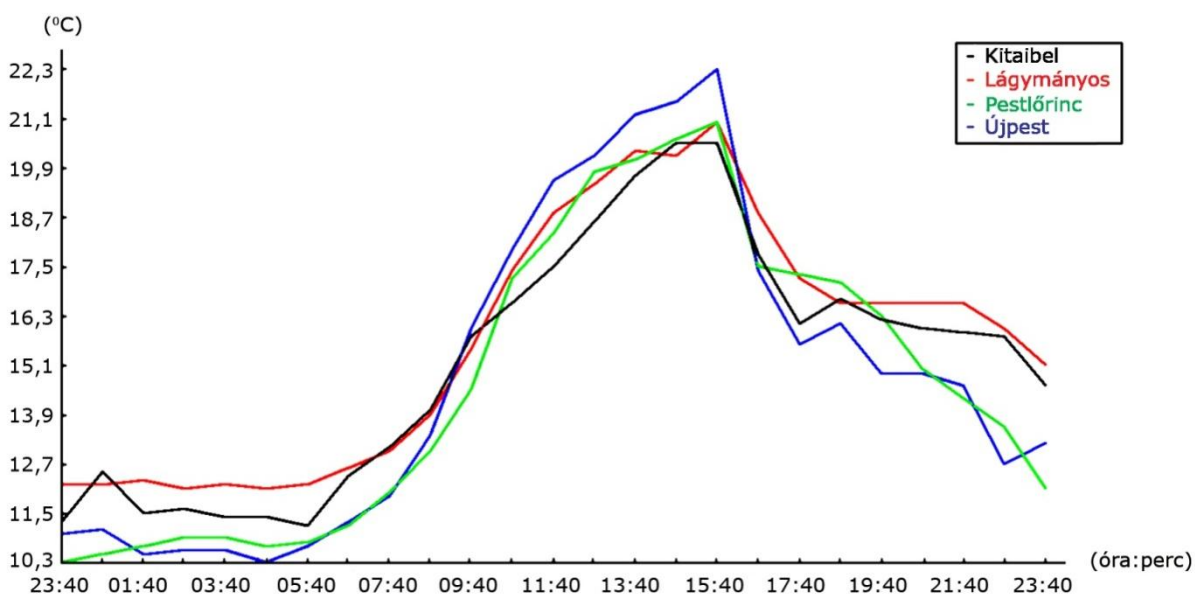
8. diagram: *A léghőmérséklet napi menete (óránként mérve) a négy budapesti mérőállomáson 2003 február 2-án [adatforrás: Országos Meteorológiai Szolgálat].*

2006 június 18.: Ismét egy derült nyári napról van szó, mikor a napsütése órák száma mind a külvárosban, mind a belvárosban 13 óra volt. A műholdfelvételen találhatóak felhőfoslányok, továbbá figyelembe véve, hogy csaknem a nyári napfordulókor készült a felvétel, ezért aznap volt valamilyen mértékű felhőzöttség a város felett. A léghőmérséklet napi menete a 9. diagram szerint alakult. Sajnos az újpesti állomásról ezen nap esetében nincs adatunk. Ezúttal a napi maximum- és minimumhőmérsékletet is a Pestlőrinci mérőállomáson mérték, $30,2^{\circ}\text{C}$ -ot, illetve $17,9^{\circ}\text{C}$ -ot.



9. diagram: *A léghőmérséklet napi menete (óránként mérve) a négy budapesti mérőállomáson 2006 június 18-án [adatforrás: Országos Meteorológiai Szolgálat].*

2008 május 6.: A napsütéses órák számát mind a belvárosban, mind a külvárosban 8-8 órának mérték. E napon is tapasztalható volt némi felhősödés, azonban a műholdkép ennek ellenére jól használható volt, tehát azt mondhatjuk, hogy egy jobbára derült napról van szó. A léghőmérséklet napi menete a 10. diagram szerint alakult. A maximális hőmérsékletet ismét Újpesten mérték, 22,3 °C-ot, míg a minimumot Újpesten és Pestlőrincen, ez egyaránt 10,3 °C volt.



10. diagram: *A léghőmérséklet napi menete (óránként mérve) a négy budapesti mérőállomáson 2008 május 6-án [adatforrás: Országos Meteorológiai Szolgálat].*

Az adatokat tekintve elmondhatjuk, hogy mindegyik megfelel az előzetes várakozásoknak, mind a 4 mérőállomás napi adatsorai meglehetősen jól korrellálnak egymással, két jelentősebb kivétel van ez alól, az egyik a téli (2003 február 2.) grafikonon a Pestlőrinci állomás mérése szerint ott jóval erősebb éjszakai lehűlés volt tapasztalható, mint a másik három mérőállomásnál. Ennek oka elsősorban a külvárosi helyzet, mely összhangban van a városi hőszigettel kapcsolatos általános tapasztalatokkal, tehát, hogy város szélén, városon kívül sokkal jelenősebb az éjszakai lehűlés mértéke, mint a városközpontok esetében. Ugyanakkor a másik külvárosinak tekinthető mérőállomás, az újpesti esetében ez a lehűlés nem tapasztalható, mely elsősorban a Duna közelségével és annak hatásával magyarázható (lásd. 4.5. fejezet). A másik nagyobb eltérés a 2006-os nyári (2006 június 18.) grafikonon látható, a Kitaibel Pál utcai mérőállomásnál éjszaka sem ment 20°C alá a hőmérséklet, amely a belvárosi helyzettel és így az erősebb hősziget hatással magyarázható.

Ami szembetűnő a műholdas felvételek felszínhőmérsékleti értékeivel összehasonlítva, hogy azok jelentősen magasabbak a nyári és a tavaszi esetekben, mint az itt tapasztalható óránként mért léghőmérsékletek. Ennek magyarázata előszörban a kétfajta hőmérséklet eltérő napi menetében keresendő [Vukovich, 1983], [Roth et al., 1989]. A korábban említett összevetés kapcsán meg kell jegyezni, hogy ott havi és éves átlagok összevetéséről volt szó, a MODIS szenzor által készített felvételek alapján számolt havi és éves átlagokkal. A hősziget napi menetével kapcsolatban rendkívül fontos megjegyezni, hogy a MODIS szenzor két műholdon is működik, így egy adott területről naponta kétszer készül ilyen felvétel, egy a délelőtti órákban (Budapesten 9 óra 44 perckor, egy pedig az esti órákban 21 óra 44 perckor). Figyelembe véve a szakirodalom adatait a felszínhőmérséklet és a léghőmérséklet napi menetének eltéréseire láthatjuk, hogy ellentétben a léghőmérséklettel a hősziget maximuma nem a napnyugta utáni órákban, hanem jóval korábban, a nappali időszakban alakul ki. Tehát ilyen szempontból vizsgálva nem túl szerencsés szempontunkból (legalábbis Budapest vizsgálata szempontjából), hogy csak az egyik műholdra telepítettek ASTER szenzort, ráadásul arra, amelyik a délelőtti órákban mér. Így az Aster adatok esetében nincs lehetőség olyan kiegyensúlyozott átlagok képzésére, mint a MODIS adatok esetében.

További tényező, mely az értékekben jelentkező fokozottabb fluktuációval jár a korábban már említett felbontóképesség. Mivel az ASTER szenzornak egy nagyságrenddel jobb a felbontóképessége, ezért sokkal jobban vizsgálható vele a városi hősziget finomszerkezete. Ugyanakkor egy rendkívül összetett városi felszín esetében, ahol egyes felszínek (tetők) felszínhőmérséklete a felszíni mérések [Hidy et al., 2011, 21-25 o.] tanúsága szerint 50°C fölé is mehet, a jobb felbontóképesség eredménye szükségszerűen a nagyobb szórás a hőmérsékleti adatokban. A MODIS képek 1 km-es felbontóképessége azt

eredményezi, hogy 1 db hőmérsékleti érték 1 km²-t jellemez, kiátlagolva az ott található összes felszín hőmérsékletét (viszonyításképpen a Wekerle-telep 1 km², az építésekor még önálló városrészhez a MODIS felvételen egyetlenegy felszínhőmérsékleti érték tartozik).

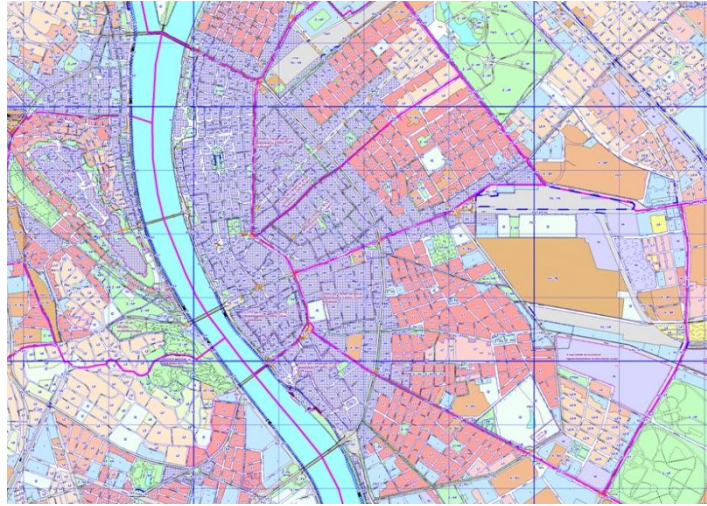
A harmadik tényező, amit figyelembe kell vennünk, hogy a nyári és a tavaszi esetben az Aster felvétel készítésének időpontjában már több órája fent volt a Nap, valamint ezen időpontokban a Nap állásszöge már viszonylag magas. Vagyis mesterséges felületek már lényegesen magasabb hőmérsékletűek lehetnek ekkorra, mint a léghőmérséklet a környezetükben.

A fentiek együttesen magyarázzák az ASTER szenzor által generált felszínhőmérséklet értékek és a léghőmérséklet jelentős eltérését, ugyanakkor azonban, mivel a levegő hőmérsékletének emelkedése a felszín melegítő hatásának köszönhető, ezért az ASTER felvételek elemzése rendkívül hatékony eszköznek bizonyul a városi hősziget kialakulásáért felelős különböző felszíntípusok és beépítés elemzésében.

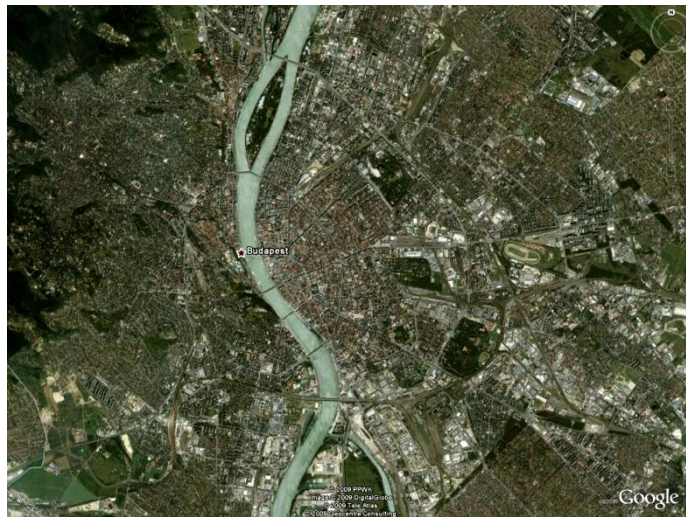
III.2.5. Az adatok feldolgozásának módszerei, egyéb adatforrások felhasználása

Az elsődleges adatforrásunk a vizsgálatainkhoz, mint fentebb taglaltuk, az ASTER termális infravörös műholdképekből áll. Ezeknek a térbeli felbontóképessége 90 m, egy-egy kép 700 x 830 pixelből (hőmérsékleti értékből) áll, amelyek durván 60 km x 60 km-es területet fednek le. Az adatok hőmérsékleti érzékenysége 0,1 K, a felvételek UTM (Universal Transverse Mercator) vetületi rendszerben készültek. A képek formátuma ún. .hdf (hierarchical data format) mely lehetővé teszi a képként és az adattáblázatként történő kezelést egyszerre [http://eosweb.larc.nasa.gov/HBDOCS/hdf_data_manipulation.html megnyitva 2012.03.25-én]. Alapvetően táblázatként jelenik meg ez a fajta adatbázis, amelyből különbözőképpen (szürkeárnyaltos, színes) lehet képeket készíteni.

A hőmérsékleti értékek mellett szükséges a városi beépítés ismerete is, ehhez Budapest területhasználati tervlapjait (FSZKT, Főváros Szabályozási Keret Terv) használjuk fel (10. kép), valamint, arra az esetre, ha a területhasználat nem adna magyarázatot valamely hőmérsékleti anomáliára, légifotókat [Székely, 2001] illetve a Google Earth felvételeket [<http://maps.google.hu> megnyitva 2012.03.25-én] is alkalmazunk (11. kép).

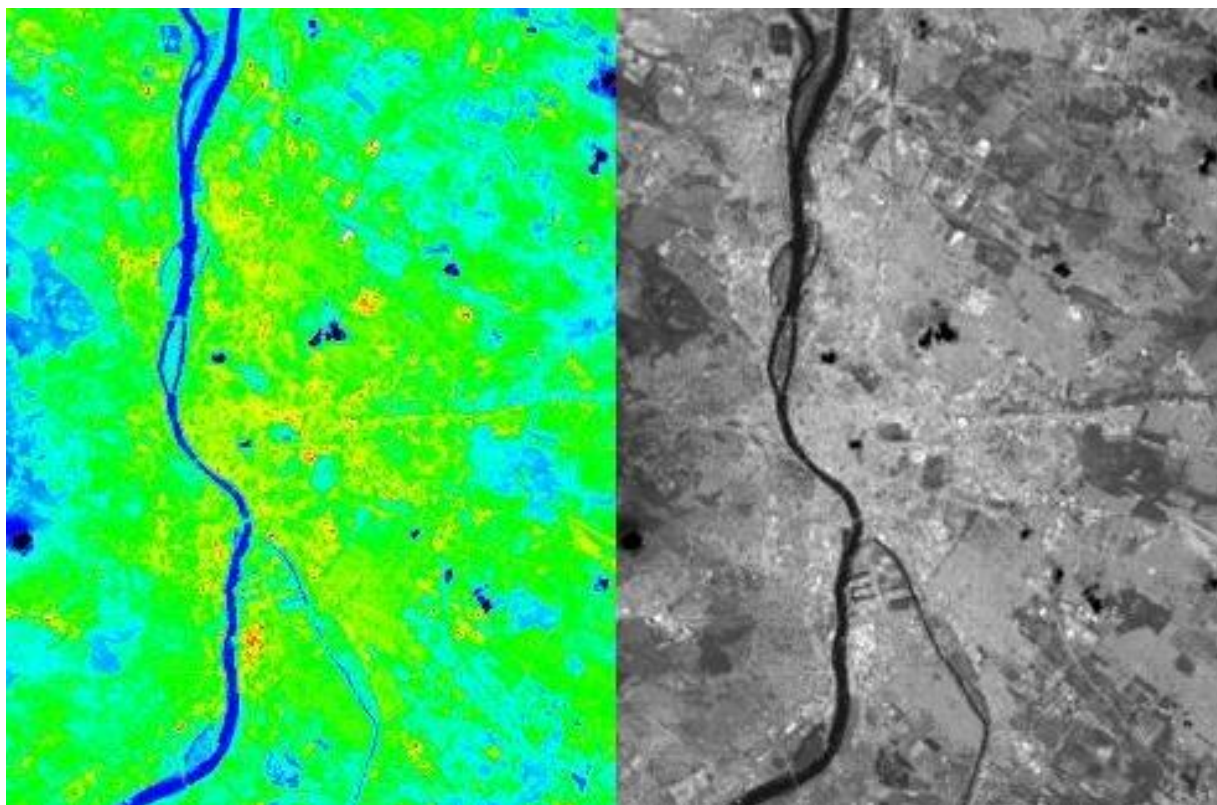


10. kép: Budapest Főváros Szabályozási Kerettervének belső kerületekre vonatkozó területhasználati tervlapja.



11. kép: A Google Earth térképe Budapestről

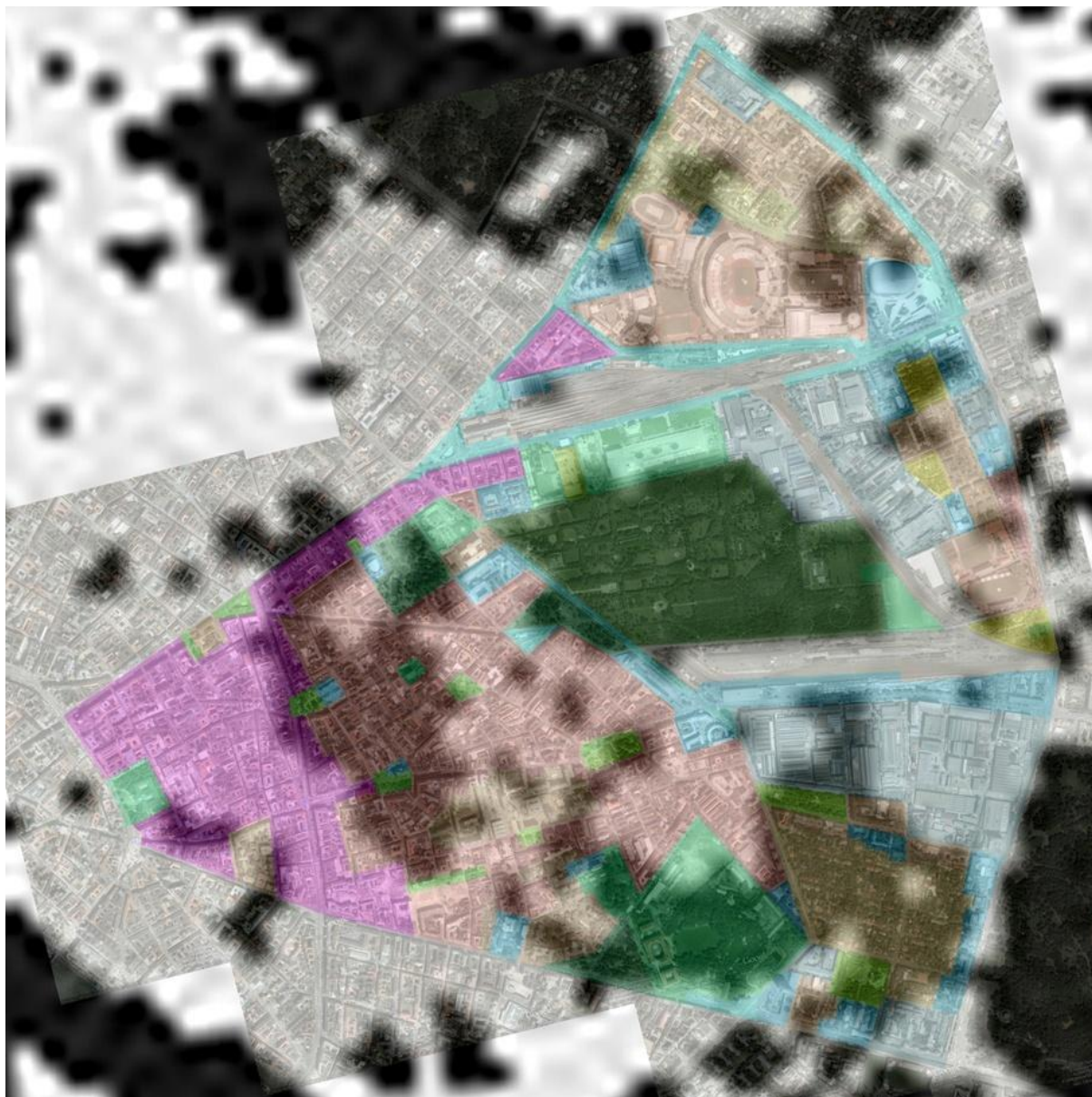
A különböző felvételeket a feldolgozás során mindenképpen fedvénybe kell hozni az elemezhetőség érdekében, azonban még ezt megelőzően magukat a termális infravörös felvételeket is fel kell dolgozni a kvantitatív értékelhetőség érdekében. A feldolgozást a következőképpen végeztük: A műholdképek elsődlegesen szürkeárnyaltos képként jelennek meg (bár a szemléltetés érdekében van lehetőség színes képekként történő reprezentálásukra is), vagyis minél sötétebb az adott pixel, annál hűvösebb az adott felszínrészlet (12. kép).



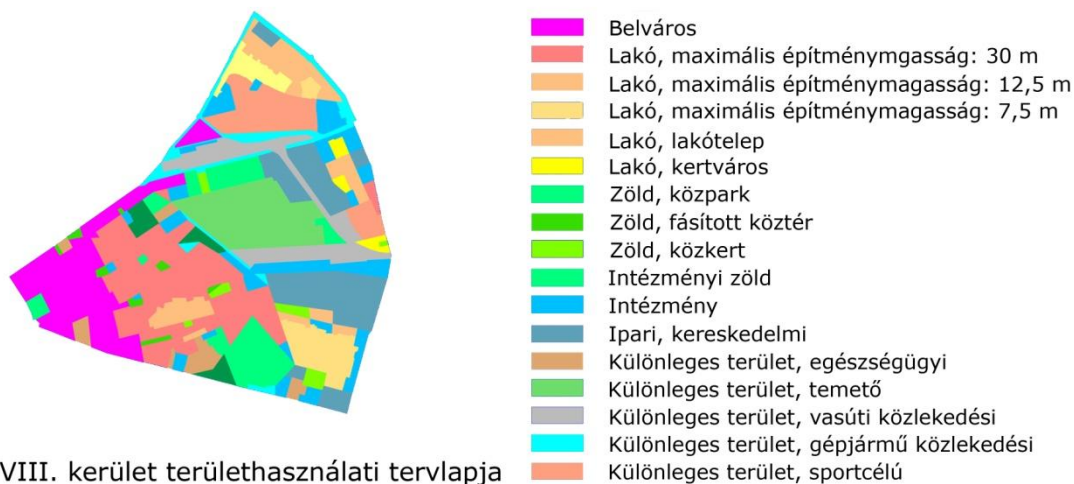
12. kép: *Budapest ASTER termális infravörös műholdképe (2001.07.06). A bal oldalon hagyományosnak tekintett reprezentációja látható a hőmérsékleti adatoknak (a kék szín a leghűvösebb, a piros szín a legforróbb, a zöld és a sárga pedig a közöttük levő hőmérsékletű felületeket reprezentálja). A bal oldali kép a valósághoz legközelebb álló reprezentációt mutatja be, a világos felületek a melegebbek, a sötét felületek a hűvösebbek.*

Mindez a kvantitatív elemzést nem teszi lehetővé fedvények esetében, ezért az egyes képeket felbontottuk képsorozatokká. Minden eleme ezen képsorozatoknak jellemezhető egy küszöb hőmérséklettel, a világos színű felületek az ennél a küszöb hőmérsékletnél melegebb területeket, a sötétek pedig az ennél hűvösebb területeket jelentik. Így megkaphatjuk a felszíni izoterma vonalakat, illetve a pontos struktúráját is elemezhetjük a városi hőszigetnek az adott esetben. Ezen képsorozatok minden elemét fedvénybe hozhatjuk a területhasználati térképlapokkal és a Google Earth, illetve a légifelvételekkel is (13. kép). Mivel viszonylag kis területet vizsgáltam, így a különböző vetületű térképek, felvételek illesztése a jellegzetes pontok mentén történik, az illesztési hibák így is néhány méteren belül maradnak, miközben egy pixel mérete 90 m x 90 m. Az ilyen képsorozatok elemzésével világosan elkülöníthetőek, lokalizálhatóak a leghűvösebb és a legmelegebb pontok (pixelek), valamint azok hőmérsékleti értékei is egzaktul meghatározhatóak. További előnyük, hogy az izoterma vonalak megjelenítésével az egyes területhasználati egységekhez és nagyobb homogén felületekhez tartozó hőmérsékleti értékek is egzaktul elkülöníthetőek, ezáltal lehetőség nyílik az egyes

területhasználati egységek (14. kép) hőmérsékletre gyakorolt hatásának a tényleges elemzésére.



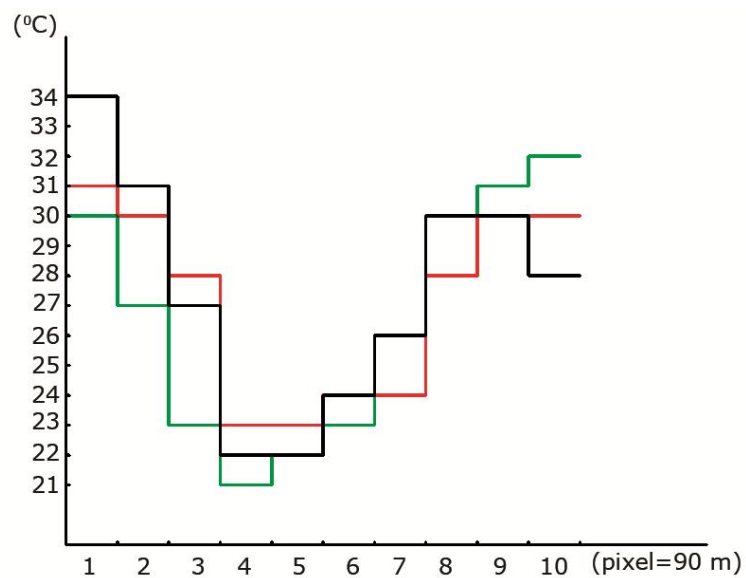
13. kép: Hőmérsékleti eloszlás és területhasználat fedvénye.



A VIII. kerület területhasználati tervlapja

14. kép: *A VIII. kerület területhasználata (a térkép a Fővárosi Szabályozási Keretterv VIII. kerületre vonatkozó területhasználati tervlapja alapján készült, azonban tartalmaz egyszerűsítéseket, melyek műholdas vizsgálat kiértékelését könnyítették meg).*

A másik módszer, amit alkalmaztam, a hőmérséklet lineáris eloszlásának a vizsgálata. Ennek során egy adott vonal mentén vizsgáltam, hogy hogyan változik a hőmérséklet. Mindennek nagy előnye, hogy az egyes területhasználati egységek határánál rendkívül jól lehet vizsgálni a hőmérsékleti átmeneteket, valamint azt, hogy az adott felület hőmérsékletre gyakorolt hatása mennyire érezhető az adott felülettől távolodva. Mivel az ASTER termális infravörös felvételek térbeli felbontóképessége 90 m, ezért az ilyen eloszlások, bár egyfajta “hőmérsékleti metszetnek” tűnnek, valójában azonban egy 90 m széles sávot reprezentálnak. Három ilyen “metszetvonalat” ábrázolva lehetőség nyílik egy 270 m széles sáv hőmérsékletének a feltérképezésére (11. diagram). A függőleges tengelyen minden esetben a hőmérséklet értékeket vettem fel (°C), míg a vízszintes tengelyen a távolságot, a felbontóképesség egységében (1 pixel=90 m) kifejezve.



11. diagram: *Példa ún. hőmérsékleti metszetre. A különböző színek az egymás melletti keresztmetszeteket (szomszédos pixelsorokat) jelképezik.*

A kétfajta elemzési módszer (tervezői hasonlaltal élve, függőleges és vízszintes síkú metszetek készítése) lehetővé teszi az ASTER műholdfelvételek által prezentált hősziget pontos térbeli struktúrájának az elemzését, és a felszíni jellemzőkkel való összevetését.

IV. EREDMÉNYEK

Budapest területén, a megfelelő szempontok szerint kiválasztottam egy mintaterületet, majd az eredményeim a következőképpen alakultak. Az itt tapasztalt anomáliák kapcsán részletesen elemeztem a nagyméretű épületek környezetükre gyakorolt hatását az ASTER termális infravörös felvételek alapján. Mivel alapvető gyakorlati célom, hogy megtaláljuk azokat a módokat és eljárásokat, melyekkel a városi hősziget csökkenthető, így részletesen elemeztem azt a kétfajta felületípust, mely a leghűvösebb területnek bizonyult a kritikus időszakokban.

Az első mintaterület kiválasztásának szempontjai a következők voltak. Alapvetően a különböző területhasználati módokat és a hősziget térbeli szerkezete (illetve az azt erősen meghatározó felszínhőmérséklet területi eloszlása) közötti összefüggéseket akartam vizsgálni. Így tehát a vizsgált területrésznek kellően közel kellett lennie a város belső területeihez, hogy a városi hősziget érdemben vizsgálható legyen a területen. Vagyis így külvárosi terület nem jöhetett szóba.

Továbbá rendkívül fontos volt, hogy minél változatosabb legyen a területhasználat, így a kiválasztásnál Budapest területhasználati térképeire (FSZKT) nagyban támaszkodtam. Külső kerület nem csupán azért nem jöhetett szóba, mivel ott viszonylag kisebb a hősziget mértéke, hanem azért sem, mivel ott a területhasználat nem kifejezetten diverz, alapvetően kisvárosias beépítés, nagyobb zöldfelületek és ipari területek váltják egymást, amely az összes fajta területhasználatnak csupán egy rendkívül kis (bár lényeges) szeletét reprezentálja. Budapest belvárosa (elsősorban az V., VI., VII., kerületek) szintén nem jöhetett szóba, hiszen itt szinte kizárólag városközponti, illetve nagyvárosi beépítés található, elszórtan néhány kisebb zöldfelülettel tarkítva, azonban ezen zöldfelületek mérete is olyan kicsi, hogy nem volt várható ezen kerületek esetében, hogy az ASTER termális infravörös felvételekkel történő vizsgálata egzakt, kvantitatív eredményekhez vezessen a térbeli felbontóképesség (90 m) által állított korlátok miatt.

Ami még szintén fontos szempont volt, hogy a területnek lehetőség szerint nagyjából síknak kellett lennie. Ennek oka az, hogy a domborzati hatások rendkívüli mértékben befolyásolhatják a hősziget kialakulását. Hozzá kell tenni, hogy a műhold viszonylag korán (magyar idő szerint 9:44-9:46-kor) vonul át a város felett és a felvételek is ekkor készülnek. A viszonylag korai időpont miatt a felszíni hősziget egyáltalán nem tud teljes intenzitásában kialakulni, hiszen az délutánra történik meg. Mindez az eloszlások és a térbeli szerkezet vizsgálata szempontjából nem okoz gondot, viszont jelentős domborzat esetén a délelőtti napállásszög domborzat jelenléte esetén igen komoly árnyékolást okozhat, mely alapvetően más hősziget eloszlást eredményez. További probléma, hogy a domborzat jelentősen meg

tudja változtatni környezetének a klímáját (lásd hegy-völgyi légkörzés [Péczy, 1979, 169. o.]), mely hatás elkerülhetetlenül hozzáadódik a városklíma hatáshoz, ami jelentős nehézséget okozna a vizsgálataim feldolgozása során.

A domborzathoz hasonlóan befolyásoló hatása van Budapest esetében a városklímára a Dunának, mely átszeli a várost. A folyó kritikus nyári időszakban a leghűvösebb felülete a városnak, és beépítéstől függően valószínűsíthetően jelentős hatással bír a parti területeken a helyi klímára, így az első vizsgálati helyszín kiválasztásakor cél volt egy nem közvetlenül a folyó mellett elhelyezkedő terület kiválasztása.

A fenti szempontok alapján célszerű volt a pesti oldalon kiválasztani egy területet, mely közel van a városközponthoz, azonban nem határos a Dunával. A változatos területhasználat rendkívül fontos szempont volt, így a választás végülis a VIII. kerületre esett. A kerületet határoló egyes, valamely szempontból figyelemreméltó területek is a vizsgálat tárgyává lettek a későbbiekben, így a XIV. kerület Hungária körút, Thököly út és Dózsa György út közötti területe, mely jelentős intézményi (I), intézményi zöld (IZ) területhasználatú városrészt jelent. Mint lokális anomáliát vizsgáltuk a kerulettől nem messze található Fővám tér melletti (már a Duna parton található) épületeggyüttest, amely a Budapesti Corvinus Egyetem főépületéből és az. I. számú Vásárcsarnokból áll, és amely nem várt felszínhőmérsékleti értékeket mutatott a felvételeink szerint.

A fenti terület (VIII. kerület) vizsgálata közvetlenül eredményezte egy másik vizsgálat szükségességét, mivel olyan kiugró hőmérsékleti anomáliákra bukkantunk, melyek egyértelműen nagyméretű önálló épületekhez köthetőek.

Mindezek mellett a továbbiakban részletesen vizsgáltam a különböző vegetációs típusokat, törekedve itt is az olyan helyszínek választására, ahol homogén, lehetőleg egy bizonyos jellegzetes társulás-típusú növényállomány vizsgálható és ennek alapján következtetéseket lehetett levonni a különböző jellegzetes növényállomány típusoknak a városi hőszigetre gyakorolt hatásáról. Mindehhez viszont mindenképpen nagyobb, homogén összetételű, jellemzően parkerdők szolgáltak ideális vizsgálati területül. Mivel a belsőbb területeken egyrészt a növényállomány foltjai túl kicsik az ASTER termális infravörös felvételekkel történő elemzéshez, és nagyobb közparkok esetén (melyek mérete lehetővé tenné ezt az elemzést) az állományszerkezet bizonyult olyan változatosnak, hogy csupán általános jellegű következtetések levonását tette volna lehetővé (pl. növényfajra nem lehet következtetni a Városliget esetében, míg külső kerületekben található homogén tölgyes, akácos és nyaras esetében minderre lehetőség nyílik).

A másik jelentős felszíntípus, mely szintén rendkívüli hatással van a hősziget szerkezetére, a vízfelület, mint ahogy ez a VIII. kerületi vizsgálatok során is kiderült.

Mindezt célszerű a különböző típusú (álló, folyóvíz) és méretű (szélességű) vízfelületek összehasonlítása. Ez esetben a Duna, illetve különböző mellékágai, valamint öblei kínáltak ideális vizsgálati helyszínt. Ezen vizsgálatnál rendkívül fontos a vizsgált terület környezetének is az értékelése, hiszen a vízfelület hatása elsősorban annak partjain lényeges és rendkívül fontos kérdés, továbbá hogy ez a hatás milyen távolságban és mennyire érzékelhető. Az ilyen vizsgálatokra a már említett, vonalmenti hőmérséklet-eloszlások elkészítése és elemzése ad lehetőséget.

A fentiekén túl még igen nagy jelentőségű a különböző típusú beépítések városi hőszigetre gyakorolt hatásának vizsgálata. Ennek elemzésére a VI. és a VII. kerület, valamint a hozzájuk északkeletről kapcsolódó Városliget vizsgálata adott jó lehetőséget. Itt az egykori városrendezésnek köszönhetően nagyon tisztán kirajzolódik a városi beépítés fellazulása a délnyugati városközponti területektől a zárt soros nagyvárosi beépítéseken, majd az egyedülálló (villaépületek) beépítési módon át egészen a park jelentette zöldfelületig, szabadtérig.

IV.1. A különböző területhasználat típusok és a városi hősziget összefüggései [Oláh, 2010a, Dobi et al., 2009]

Az ilyen típusú vizsgálatok alkalmazásával pontos képet nyerhetünk arról, hogy különböző területhasználatok hogyan és milyen mértékben tudják erősíteni, illetve gyengíteni a városi hősziget jelenséget. Ezen vizsgálatok beépítése a környezeti hatásvizsgálatok rendszerébe, illetve a nagyobb méretű objektumok építési engedélyezési eljárásába előreláthatólag lehetővé teszi az olyan típusú városfejlesztést, mely során nem, vagy csak minimális mértékben növekszik a városi hősziget mértéke.

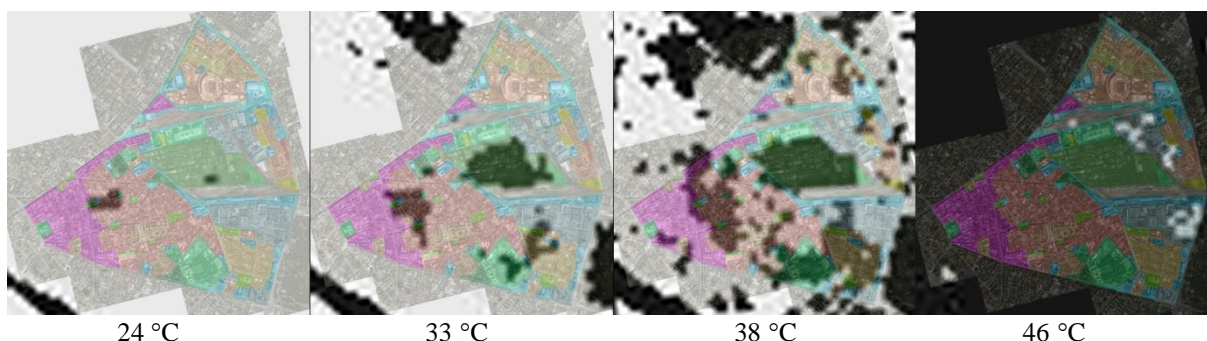
A meglévő állapot vizsgálata során fontos szempont, hogy megkeressük azokat a jelenségeket, melyek eltérnek az előzetes várakozástól. Elemzésük által hasznos információkat kaphatunk a városklíma előnyös módon történő befolyásolásához, és elkülöníthetjük azokat az építészeti megoldásokat, melyek a leginkább hozzájárulnak a negatív hatások kialakulásához.

A célterületet, mint említettük, Budapest VIII. kerülete, illetve annak határoló területei. A korábban említett szempontokhoz képest fontos megemlíteni még, hogy az elmúlt évtizedben jelentős változások is történtek itt, tehát nem csupán a hősziget térbeli és az évszakokhoz kötődő időbeli változásairól vonhatunk le következtetéseket, hanem a változó területhasználatához kapcsolódó jellemző időbeli változásáról is a jelenségnek.

4 db műholdfelvételt elemeztem ez alkalommal, egyet a nyári időszakból (2001.07.06), kettőt a tavaszból (2002.05.04 és 2008.05.06), és egyet a téliből (2003.02.02). A vizsgálatok eredményei a következők voltak.

A nyári eset (2001.07.06) (15. kép): Ez a nap száraz és napos volt. Az adott területen az átlagos kinetikus hőmérséklet 38 °C, a minimum 13 °C, a maximum 53 °C volt. Létrehoztuk az adott felvétel esetében a képsorozatot, melyeknél a küszöbhőmérsékletet 1-1 fokkal léptettük, így ez esetben 40 db képet hoztunk létre, melyeket mind fedvénybe hoztunk a Google Earth felvételekkel, valamint a megfelelő FSZKT területhasználati térképlappal. A képsorozatot végigelemezve a következő megállapításokra jutottunk: A 13 °C-os, leghűvösebb pont egy felhőfoslánynak volt köszönhető (amint azt az ugyanebben az időpontban készült látható-közeli infravörös VNIR felvétel előnézetéről megtudhattam), így erről a kisebb területről (Rákóczi tér) érdemi információt nem tudtunk nyerni ezen felvétel esetében. 19 °C-nál jelent meg a Duna vonala. 24 °C-nál jelent meg az első szárazföldi hűvös pont a Kerepesi temető területén, ahol a legidősebb zárt faállomány található. 26 °C-nál jelent meg a Városliget leghidegebb pontja a vizsgált terület északi határánál. 27 °C-nál a kisebb parkok, a leghidegebb részei a közkerteknek és az Orczy-kertben található tó válik kivehetővé. 27 °C és 33 °C között ezen zöldfelületek határvonalai tisztán kivehetővé válnak.

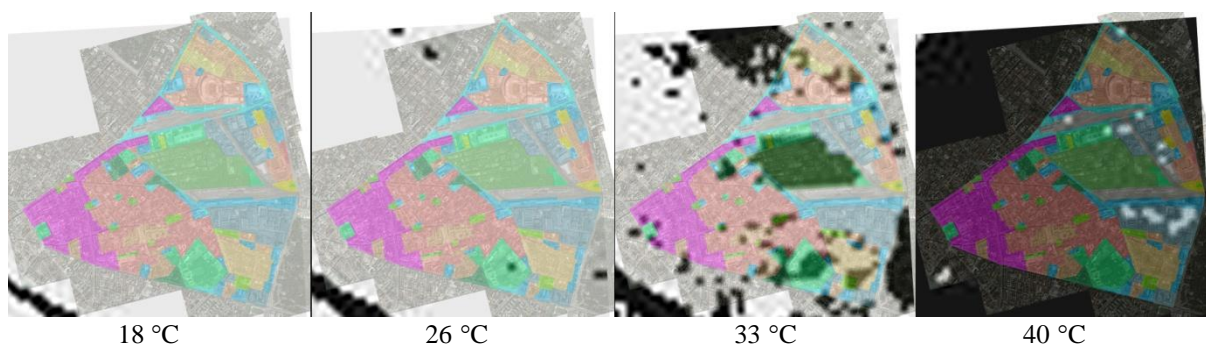
33 °C és 38 °C között már nem csupán a zöldterületek tisztán kivehetőek, hanem megjelenik a lakóterületek közötti különbség. A sűrűn lakott, 6-8 szintes épületeknél mindig magasabb a hőmérséklet, mint a kertvárosok esetében. A lakótelepek, a kertvárosok és a zöldterületek mind hűvösebbek voltak 43 °C-nál. Azon területek, melyeknél a kinetikus felszínhőmérséklet 44 °C és 53 °C közé esett, azok tipikusan a gyárterületek, egyéb ipari zónák, valamint a vasúti területek.



15. kép: A vizsgált terület (VIII. ker.) különböző küszöbhőmérsékletű kompozit képei (2001.07.06)

Az első tavaszi eset (2002.05.04) (16. kép) : Szintén egy derült napról van szó, mikor az átlagos kinetikus felszínhőmérséklet az adott területen 34,5 °C, a minimum 15 °C, a maximum pedig 44 °C volt. 15 °C és 24 °C között csupán a Duna sávját láthatjuk, vagyis minden más terület melegebb, mint 24 °C. 18 °C-nál a Duna hídjai tisztán kivehetőek. 25 °C-nál jelenik meg az első zöldterület, ezúttal a Városliget területén. Az Orczy-kert tava valamint a Népliget hűvösebb pontjai 26 °C-nál jelennek meg. A Kerepesi temető leghűvösebb pontja csupán 27 °C-os. 27 °C és 34 °C között a helyzet hasonló a nyárihoz. 33 °C-nál a Köztársaság tér tisztán kivehető. Ez a tér két nagyobb részből áll. A nagyobb rész parkosított, a kisebbiken egy színház (Erkel Ferenc színház) és az azt körülvevő burkolat található. Mikor a helyszínt bejártam, akkor tapasztalhattam, hogy a színháznak fém tetőfedése van. 33 °C-nál tisztán kivehető a hűvös L-alakú zöld terület és a meleg négyzete a színháznak. 35 °C és 44 °C között a szituáció szintén nagyon hasonló a nyári esethez.

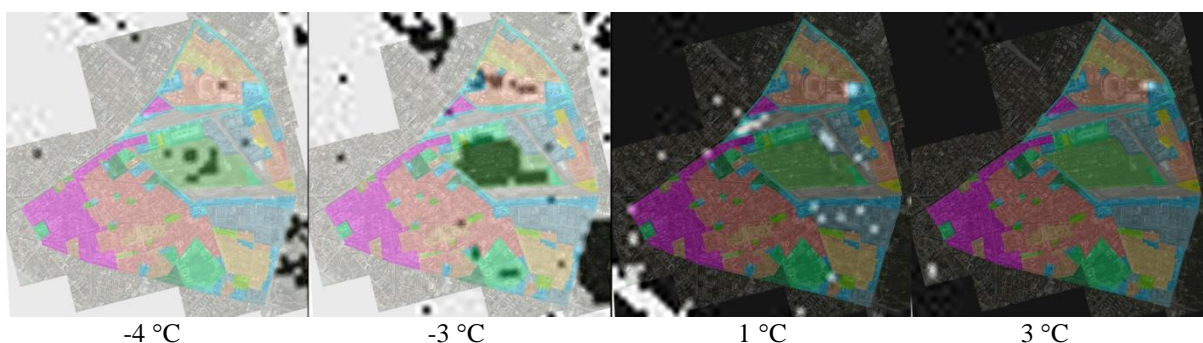
Fontos hogy beszéljünk egy épületegyüttesről, ami kívül esik a vizsgált területen. Ez a Corvinus Egyetem főépülete, valamint a mellette található I. számú Vásárcsarnok a Duna partján. Itt nincs ipari tevékenység, de az épület belső udvarai üvegfedésűek. Eme épületek így még 41 °C-nál is kivehetőek, hasonlóan a legmelegebb ipari területekhez.



16. kép: A vizsgált terület (VIII. ker.) különböző küszöbhőmérsékletű kompozit képei (2002.05.04)

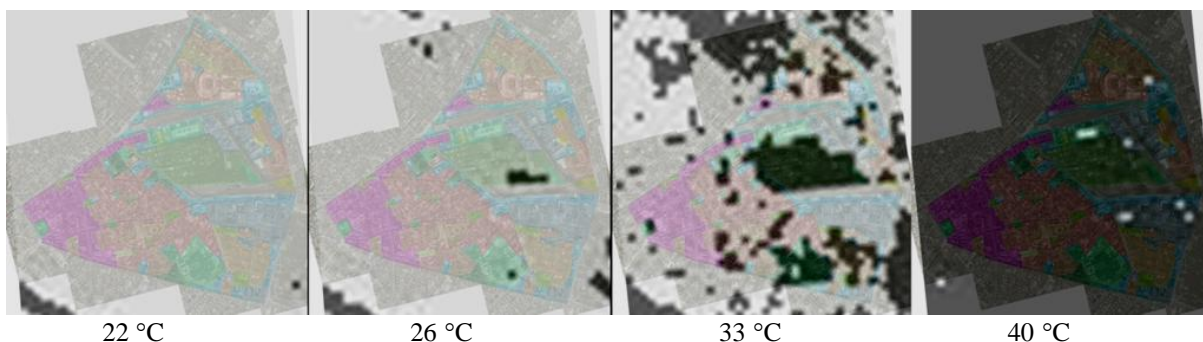
A téli eset (2003.02.02) (17. kép): Ezen a napon a vizsgált területen az átlagos kinetikus felszínhőmérséklet -1 °C, a minimum -6 °C, a maximum pedig 5 °C volt. A leghidegebb pont egy vasúti átjáró volt a vizsgált területen kívül (a város széle felé eső részen). -6 °C és -3 °C között a parkok és a nagyobb nyílt területek jelentek meg hűvös foltként. -3 °C-nál a parkok és a zöld területek határvonalai tisztán láthatóvá váltak. -2 °C és -1 °C között a kertvárosok hűvösebbnek, míg a belső, sűrűbben beépült városrészek melegebbnek mutatkoznak. 0 °C és 2 °C között a Duna vízfelszíne válik nagyon tisztán kivehetővé. 2 °C-nál csupán néhány forró pont látható. Összevetve ezeket a Google Earth

képpel és a területhasználati tervvel azt találtam, hogy nem a területhasználat, hanem az épületek fedésének az anyaga a meghatározó ilyen esetekben. Ahogy korábban is tapasztalhattam, a fém és az üvegfedésű tetők melegítik a legjobban a környezetüket.



**17. kép: A vizsgált terület (VIII. ker.) különböző küszöbhőmérsékletű kompozit képei
(2003.02.02)**

A második tavaszi eset (2008.05.06) (18. kép): Ezen műholdfelvételt azért elemeztük, mivel az előző tavaszi esethez képest jelentős változások történtek a célterület beépítésében, így jó alkalom adódott megvizsgálni az ilyen városszerkezetre kiható változások hatását a városi hőszigetre is. Ezen a napon az átlagos felszínhőmérséklet 31,8 °C, a minimum 16 °C, a maximum 46 °C volt. 16 és 23 °C között csupán a Duna jelenik meg, 24 °C-nál jelennek meg az első hűvös pontok a városi szövetben a Városliget és a Népliget belső területein. 25 °C-nál jelenik meg az Orczy-kert tava és a Kerepesi Temető belső területeinek hűvösebb része. 27 °C-nál kirajzolódik a nagyobb közparkok zárt faállománya, valamint megjelennek kisebb fásított területek, mint pl. a Köztársaság tér. 27 °C és 31 °C között megjelennek a kisebb fásított területek, a lakóterületek zölddel borított része, valamint kirajzolódik a nagyobb közparkok határa. A Kerepesi temető északi oldalán a kirajzolódó határvonal másmilyen, mint az előző tavaszi felvételen. 33 foknál ezen a területen (a Kerepesi temető és a vasúti területek között) megjelenik egy hűvös sáv. A hűvös sáv és a temető között viszont van egy kiemelkedően forró terület, mely még 40 °C-nál is látszik, holott a vasúti területek legforróbb pontja is csupán 38 °C -os. 40 °C-ot csupán már néhány pont ér el a vizsgált területen. A legforróbb pontja a területnek 42 °C-os, nem messze a Népligettől. Érdekesség, hogy a leghűvösebb pont a Népligetben található (leszámítva a Dunát), míg a legforróbb a Népliget melletti ipari területen. Elképzelhető hogy mennyivel szélsőségesebb lenne a helyzet, ha az az elképzelés diadalmaskodott volna annak idején, hogy a jelenlegi Népliget területén park helyett ipari zónát hozzanak létre [Csepely-Knorr, 2010b].



**18. kép: A vizsgált terület (VIII. ker.) különböző küszöbhőmérsékletű kompozit képei
(2008.05.06)**

A következő megállapításokra jutottam az ezen eredményeim alapján: a zárt lombkoronaszinttel rendelkező, többszintes növényállományok a leghűvösebbek, a 6-8 szintes, sűrűn beépített belvárosi területek és a ipari zónák, valamint a vasúti pályaudvarok a legmelegebbek. A fallal elválasztott zöldfelületek esetében a területen hűvösebb lehet, főleg a terület szélén, azonban az ilyen esetekben a zöldfelület kondicionáló hatása nem terjed ki annyira a szomszédos övezetre, amint az a Kerepesi temető déli oldalánál érzékelhető. A nyílt gyepfelületek általánosságban jóval melegebbek, mint a zárt faállományú területek. A lakóterületek közül a kertvárosoknak és a jól fejlett, beállt növényzettel rendelkező lakótelepeknek alacsonyabb a hőmérséklete, összevetve a zárt soros nagyvárosi beépítésű területekkel. Összehasonlítva a tavaszi és a nyári felvételeket az látható, hogy a leghűvösebb pontok mindig más területen adódtak. A tavaszi és a nyári esetek közti eltérés a különböző összetételű faállományok eltérő aspektusú állapotával, míg a két tavaszi felvétel közti különbség a 6 év alatt bekövetkező változásokkal magyarázható.

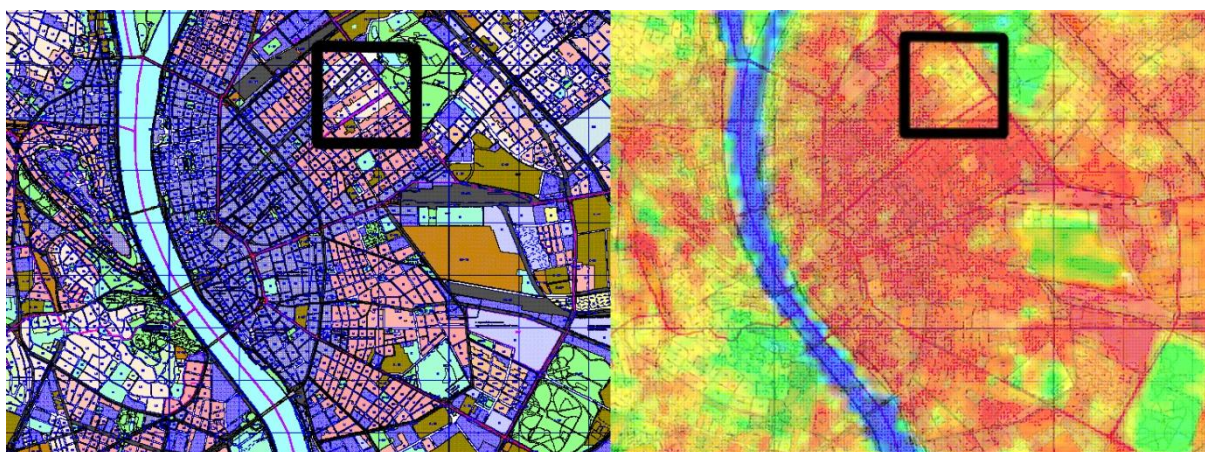
A különböző területhasználatok tárgyalásánál feltétlenül fontos szót ejteni a különböző beépítési módokról. Szabályozás szerint ismerünk szabadonálló, telekhatáron álló, ikres és zárt soros beépítési módokat. Klimatológiai, morfológiai és légáramlási szempontból alapvetően két csoportra oszthatóak, az egyik csoport az önálló, kisebb épületek köre, ide tartoznak mind a szabadonálló, mind az oldalhatáron álló, mind pedig az ikres beépítési módok. A másik csoportba pedig a zárt soros beépítési mód tartozik, ez esetben az épületek teljes mértékben elzárják a telkek nem beépített területeit (leszámítva az esetleges előkerteket, melyek jelenléte Budapesten zárt soros beépítés esetében azonban nem jellemző).

Továbbá fontos megemlíteni, hogy zárt soros beépítés esetén légáramlás csupán az utcák felett valósulhat meg a talajmenti határrétegben, továbbá a tömbbelsőekben található hűvösebb növényborította felszín és a jellemzően melegebb utcák között sem jöhet létre légáramlás. Mindennek következménye, hogy a zárt soros beépítésű területek utcái sokkal jobban felmelegednek és mivel jellemzően a beépítettség mértéke is sokkal nagyobb az ilyen

beépítésű területeken, így általánosságban is nagyobb a felmelegedés mértéke. Egy kisebb előnye lehet a zárt soros beépítésnek klimatológiai szempontból, a tömbbelső, amennyiben növényzettel borítottak, úgy jelentős mértékben hűvösebbek lehetnek a környezetüknél, ahogy azt a korábbiakban is említettük, hiszen maguk az épületek egyfajta védőfalként funkcionálnak a növényzet számára ez esetben.

Egy igen szemléletes példa erre a VI. és VII. kerület, valamint a Városliget területe. Ezen kerületekben köszönhetően az itteni tudatos várostervezésnek és beépítésnek nagyon tisztán elkülönülnek a különböző beépítési módok, melyeknek jellemzője, hogy a Belvárostól a Liget felé haladva fellazul. Az Andrássy út, valamint a Városligeti Fásor mentén ez a tendencia nagyon jól látható. Szempontunkból a Bajza utca, illetve a Dózsa György út vonala tekinthető határvonalnak, az első a zárt soros és az szabadonálló beépítésű területeket, a másik pedig az szabadonálló beépítésű területet és a közparkot választja el egymástól.

Az első tavaszi felvételt (2002.05.04) fedvénybe hozva a megfelelő területhasználati térképlappal (19. kép) egyértelműen látszik, hogy a szabadonálló beépítési mód mintegy 3-4 °C-al hűvösebb, mint a zárt soros beépítésű terület, míg a közpark ugyanennyivel hűvösebb a szabadonálló beépítésű területnél. Fontos megjegyezni továbbá, hogy ezen szabadonálló beépítés városi villaépületeket jelent, amelyek több emelet magasak, illetve a telekterület igen nagy hányadát lefedik. Összességében azt mondhatjuk, hogy csaknem ugyanazt a városi sűrűséget (szintterületi mutatót) adják, mint a zárt soros beépítésű területek, azonban azoknál sokkal kisebb a hőmérsékletet növelő hatásuk. A jelenség magyarázatát elsősorban az eltérő égbolt láthatósági faktor adja, mely ugyanolyan szintterületmutató esetén jóval nagyobb a szabadonálló beépítések esetén, mint a zárt soros épületeknél.



19. kép: A szabadonálló beépítés egyértelműen hűvösebb (sárga) foltja a Belváros (vörös) és a Városliget (zöld) között (2002.05.04).

A pontszerű anomáliák: Az első tavaszi esetben (2002.05.04) 33 °C-nál nagyon tisztán kirajzolódik a Köztársaság tér zölddel borított területe. Itt jellemző volt a zárt faállomány. A tavaszi képen előjöttek bizonyos nagyon forró pontok. Várakozásaink szerint ezek az ipari és vasúti területek belső részén adódtak, azonban mint kiderült, nem csak ott. A nagyobb üveggel vagy fémmel fedett épületek szintén kiugróan magas hőmérsékletet mutatnak. A téli felvétel elemzése során tapasztaltuk, hogy a külső kertvárosi területek és lakótelepek hűvösebbek, a városközponti sűrűn beépített területek pedig melegebbek. Érdekesség, hogy azon ipari területek, melyek nem voltak fűtöttek (raktárak), szintén hűvösebbek voltak. Azon nagyobb épületek (Sportcsarnok, Corvinus Egyetem főépülete) melyek üveg vagy fém tetőfedéssel rendelkeznek és fűtöttek voltak, viszont kiugróan melegnek bizonyultak, hőmérsékletük meghaladta még a pályaudvarok és az ipari területek hőmérsékletét is.

A második tavaszi eset (2008.05.06) nagyon érdekes olyan szempontból, hogy ezen idő alatt a területen történt egy olyan beépítés, mely méreteiben (több hektár) és hatásában rendkívül nagyarányú volt [Arena 2007]. Mindez radikálisan megváltoztatta a városi hősziget struktúráját ezen terület környezetében. Alapvetően egy egyedi nagyméretű épület hatásáról van szó, melyet részletesen a következő fejezetben mutatok be.

IV.2. Nagyméretű épületek hatása a városi hőszigetre [Oláh, 2010b]

Az előzőekben bemutatott vizsgálat során egy olyan anomáliával szembesültem, melynek elemzését célszerű külön tárgyalni. Mint azt korábban is említettem, az ASTER termális infravörös felvételek a térbeli felbontóképesség által szabott korlátok miatt nem alkalmasak épületek környezetükre gyakorolt klimatikus hatásának vizsgálatára, hanem csupán tömörszintű analízisre. Azonban mégis vannak ez alól kivételek, méghozzá a rendkívül nagyméretű intézményi, illetve középületek, melyek alapterülete több hektár is lehet, így egyrészt már megjelennek az ASTER felvételeken is, másrészt pedig, amely a felvételek elemzésekor tűnt ki, rendkívüli mértékben hatnak a környezetük klímájára [Szilágyi, 2009], így elemzésük elengedhetlenné vált a vizsgálatok során.

Az első és legfontosabb példa egy újonnan épült bevásárlóközpont az előzőekben említett vizsgálati területen, a VIII. kerületben. Az Arena Plaza 2006-2007-ben épült, Magyarország legnagyobb területű (több, mint 3 ha) bevásárlóközpontjáról van szó (2012-ig biztosan), mely a korábbi Ügetőpálya helyén található. Maga a környezet a bevásárlóközpont nélkül is elég változatos, észak felől az igen nagyforgalmú Kerepesi út és azon túl a Keleti pályaudvar vágányokkal borított területe, míg dél felől a Kerepesi temető (Budapest egyik

legnagyobb belső zöldfelülete) határolja. Nyugati szélén zárt soros beépítésű lakóterület, míg keleten a Taurus gumigyár adja a szóbanforgó létesítmény határát. Tehát rendkívül vegyes használatú területről van szó és már a szóban forgó létesítmény kivitelezése előtt is az volt.

A Pláza felépítése röviden a következő: az északi részen van egy igen széles tetőkertként kialakított zöldfelület a Kerepesi út mellett, amely alatt a Plaza mélygarázsa található, a déli részen található maga az épület, amely hagyományos lapostetős, nagyméretű üveg felülvilágítókkal, annak a déli falán, oldalán találhatóak az épületgépészeti berendezések.

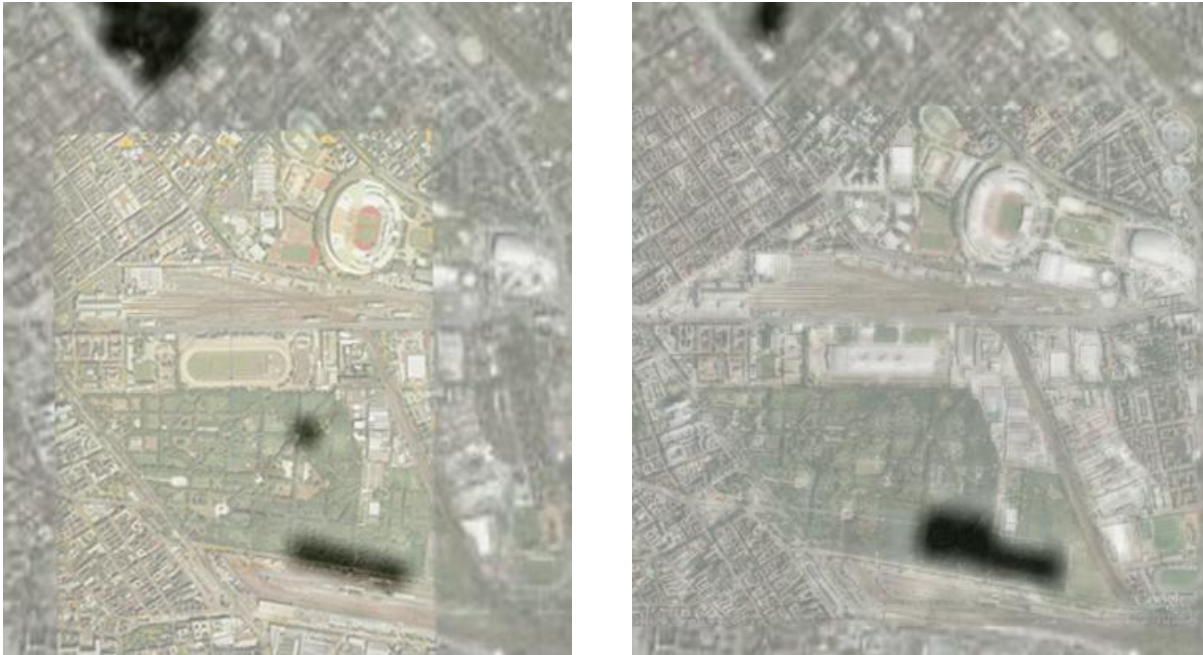
Két jellemző hőfelvételt hasonlítottam össze, az egyik 2002. május 4-én, a másik pedig 2008. május 6-án készült. A korábbi állapotokat jól tükrözi a Budapestről 2001-ben készült repülőgépes felvételsorozat (ortofotó), a jelenlegi, 2007 végétől érvényes állapotokat pedig a Google Earth térképről olvashatjuk le. Ezen ortofotókat illetve műholdképeket egyaránt hozzáillesztettem a megfelelő infravörös felvételhez, majd elvégezve a hőmérséklet szerinti felbontást, pontosan látható, hogy mely terület hány fokos felszínhőmérsékletű volt a megfelelő időszakokban.

A másik vizsgálati ill. szemléltetési módszer, mely ez esetben igen jól alkalmazható volt, az ún. hőmérsékleti metszetek felvétele. A vizsgálat során azt a problémát, hogy a két felvétel esetén e metszetsíkok nem pontosan egymásra illeszkednek, úgy küszöböltük ki, hogy több egymás mellett felvett vonalat is egyszerre ábrázoltunk. Mint később látni fogjuk, ezek karakterisztikája nagyfokú hasonlóságot mutatott több esetben is, tehát az eredmények szignifikánsnak tekinthetők.

Alapvetően három helyen vettem fel metszeteket, melyek jellemzően észak-déli irányúak voltak. Az első hely a Baross térhez közelebb eső részen volt (a nyugati részén a vizsgált területnek), a második a vizsgált terület középső része, a harmadik pedig a keleti rész, a Taurus gumigyár közelében.

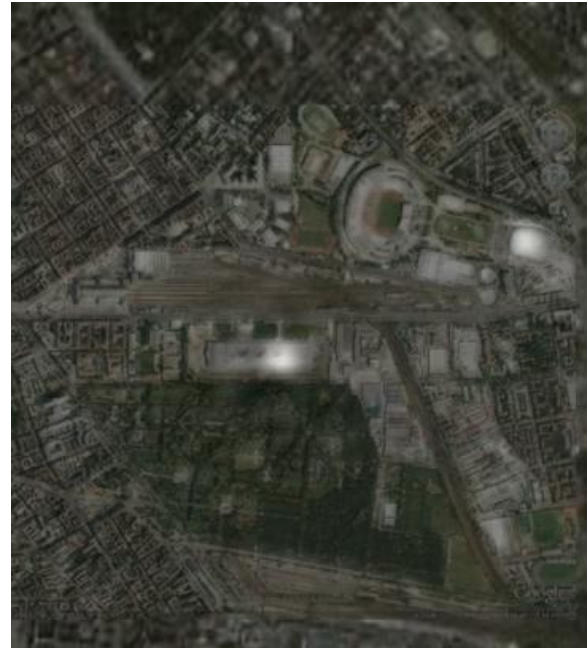
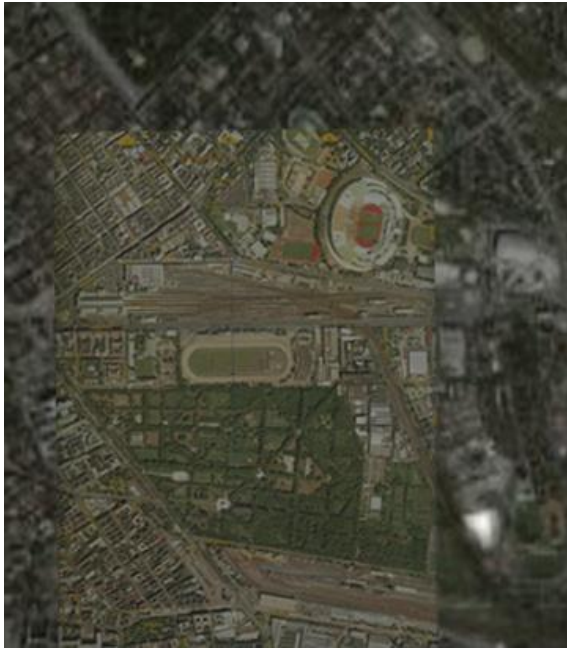
A hűvös pontok helye és hőmérséklete: Ahogy előzetesen várható is volt, a leghűvösebb pontok a vizsgált területen a nagyobb zöldfelületeknél adódtak. Ezen zöldfelületek a Kerepesi temető belső részei, valamint a Városliget nagy zöldfelülete (20. kép). Meg kell jegyezni, hogy a teljes vizsgált terület átlagos felszínhőmérséklete 2002. május 4-én 33,18 °C, míg 2008. május 6-án 30,26 °C volt. A leghűvösebb területek 2002-ben 28 °C-osak, míg 2008-ban 25 °C-osnak adódtak. A felszínhőmérsékleti maximumoknál tapasztalható anomáliáktól eltekintve, ez a mintegy 3 fokos különbség jellemzi több területen is a két felvételt, vagyis elmondható, hogy a felszínhőmérsékleti eloszlások jellege eme konstans eltéréstől eltekintve hasonlóan alakul azon területeken, ahol nem történt lényeges változás a területhasználatban és a felszínborításban. Fontos megemlíteni, hogy bár az adott területen

nem található nagyobb méretű vízfelület, a tágabb környezetet vizsgálva a Duna felszíne volt a leghidegebb, 2002-ben 23 fokosnak, míg 2008-ban 20 fokosnak bizonyult.



20. kép A leghűvösebb pontok eloszlása a vizsgált területen 2002.05.04-én és 2008.05.06-án

A forró pontok helye és hőmérséklete (21. kép): ennek vizsgálata során szembesültem először a jelentős változással, amit az új épület okozott. A 2002-es képen a legforróbb pont egy ipari területen, a vasúti vágányok mellett adódott, a hőmérséklete pedig 44 °C volt. Ez teljesen megfelelt az előzetes várakozásaimnak, azonban a 2008-as felvételen a forró pontok már teljesen más területeken adódtak. Ezen pontok egyike az Arena Plaza teteje, a másik pedig az új sportcsarnok, a Papp László Budapest Sportaréna. A Pláza tetőszerkezetéről és fedéséről már volt szó, a Papp László Budapest Sportaréna pedig szintén teljesen fedett és az egész épület fémlemez borítású. A forró pontok hőmérséklete a 2008-as felvételen is 44 °C-osnak adódott, ami azért lényeges, mert az átlaghőmérséklet mintegy 3 °C-kal kevesebb volt ezen felvétel készítése idején, mint a 2002-es esetében. Vagyis elmondhatjuk, hogy az új épületek sokkal több hőt adtak le a közvetlen környezetüknek, mint az ipari épületek, holott itt nincs ipari, csupán intézményi funkció.



21. kép A forró pontok helye 2002-ben (iparterületen) és 2008-an (intézményi épületeknél)

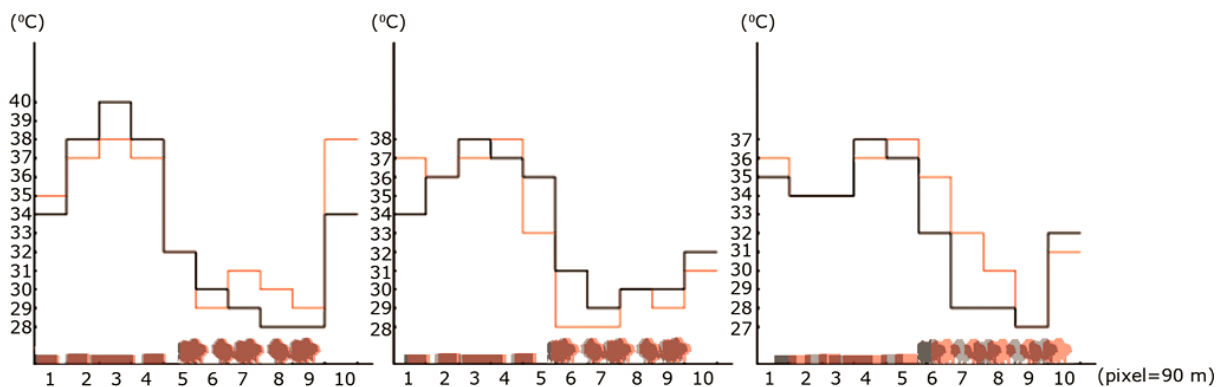
Jellemző hőmérséklet-eloszlás: a 2002-es felvételen 35 °C-nál látható a jellemző eloszlása a hűvösebb és a melegebb területeknek, míg a 2008-as felvételen 38 °C-nál látható mindez igen jól (itt is megnyilvánul a 3 °C-os hőmérséklet-különbség). Jól látható, hogy az ipari területek, a Keleti pályaudvar, a Taurus gumigyár mindkét esetben meleg területek, míg a Kerepesi temető, a Városliget és a kertes lakóterületek jellemzően hűvösebbek. Jelentős eltérés az Arena Plaza, vagyis a korábbi Ügető területén látható. Míg 2002-ben az Ügető középső része (nagy, nyílt, biológiailag aktív felszín) egyértelműen hűvösnek mutatkozott, addig 2008-ban pont ez a terület (a ráépített Arena Plaza-val) vált a legmelegebb ponttá a környéken.

Érdemes még megtekinteni az Arena Plaza épülete és a Kerepesi út közötti területet, ami jelenleg a Plazahoz tartozó tetőkert (22. kép). Ez is viszonylag hűvösebbnek bizonyult (32 °C-os) azonban az ilyen típusú zöldfelület hatása messze eltörpül a Városliget és a Kerepesi temető zárt lombkoronaszintű faállományához képest.



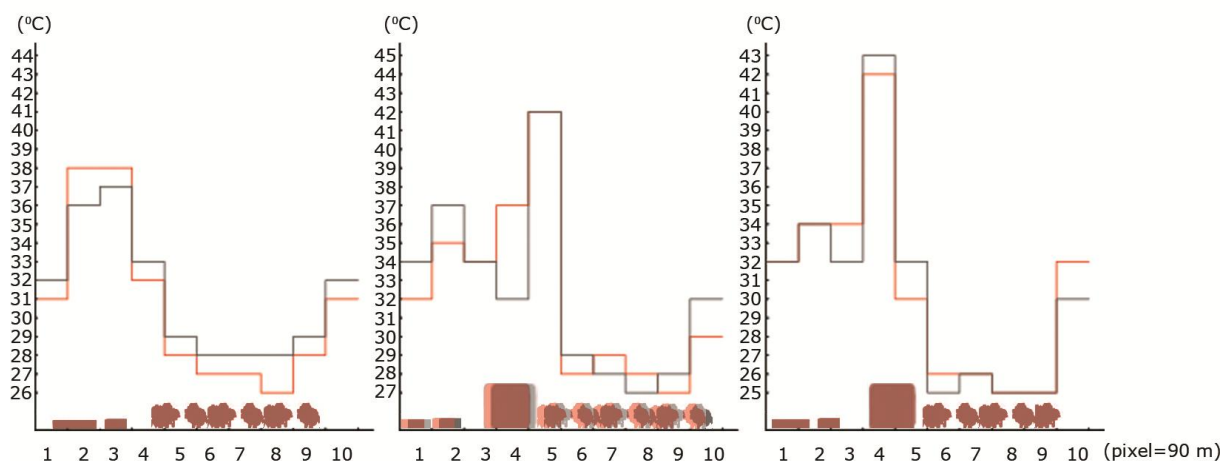
22. kép Az ügető hűvös foltja 2002-ben és a Plaza hűvös zöldtetője 2008-ban, a bejelölt metszetsvonalakkal

A hőmérsékleti metszetek elemzése a következőképp történt. A metszetek észak-déli irányban lettek felvéve, a grafikonokon két szomszédos adatsort ábrázoltam. A 2002-es felvétel (12. diagram) elemzése során jól látható, hogy a Keleti pályaudvarhoz közeli részen magasabb a hőmérséklet, míg a Kerepesi temető felé jelentősen csökken. A következő diagramon is ez látható, a hőmérséklet-különbségek azonban nagyobbak, hiszen itt a vasúti sínek jóval magasabb hőmérsékletűek, majd a hőmérséklet egyenletesen csökken a Kerepesi temető belső területei felé haladva. Az utolsó 2002-es grafikonon ismét változik a hőmérséklet eloszlása, köszönhetően a Taurus gumigyár hatásának, itt nem süllyed le annyira a hőmérséklet, ahogy haladunk a sínektől dél felé.



12.diagram: *A jellemző hőmérsékleti eloszlások a Keleti Pályaudvartól a Kerepesi temetőig 2002-ben. Az eloszlások alatt a jellemző felszíntípus látható, a különböző színek az egymás melletti keresztmetszeteket (szomszédos pixelsorokat) jelképezik.*

A 2008-as felvételnél nagyjából ugyanott vettem fel a metszeteket (13. diagram). A Keleti pályaudvarhoz közel eső részen nem változott lényeges a hőmérséklet-eloszlás jellege, itt megfigyelhető még a szignifikáns 3 °C-os hőmérséklet-különbség. A középső résznél készített metszetenél viszont teljesen más a helyzet. A síneknél látható egyfajta hőmérsékleti másodmaximum, utána azonban nem kezd el egyenletesen csökkeni a hőmérséklet, hanem egy kisebb mértékű csökkenés (az Arena Plaza-hoz kapcsolódó tetőkert) után hirtelen jelentősen megugrik és eléri a már említett 44 °C-os maximumot, majd ezután kezd el rendkívül meredeken csökkenni a Kerepesi temető felé, kicsit eltolva a hűvös zóna határát, tehát a temető zöldfelületét melegítve. A Taurus gumigyárnál szintén változik a helyzet, az Arena Plaza épülete és a gyár között csupán burkolt terület van néhány fasorral, ezért a helyzet nagy mértékben hasonlóvá válik a középső részen tapasztalthoz.



13. diagram: A 2008-as felvételeken világosan látszik a változás, az új bevásárlóközpont forró tömbje. Az eloszlások alatt a jellemző felszíntípus látható, a különböző színek az egymás melletti keresztmetszeteket (szomszédos pixelsorokat) jelképezik.

A vizsgálataim és az azokból kapott eredmények alapján a következő megállapításokat lehet tenni. Mindannak ellenére, hogy az építészeti léptékhez képest, a vizsgálatban felhasznált műholdképek felbontása durvának (90 m) tekinthető, és hogy inkább általános városi tendenciák bemutatására alkalmas, mégis léteznek olyan önálló épületek, melyek önmagukban képesek jelentős, jól detektálható hatást elérni. Az Arena Plaza talán a legdominánsabb ilyen új képviselője ezeknek az épületeknek, de ide sorolható az új Papp László Budapest Sportaréna is. Sajnos a vizsgálatok alapján azt kell mondani, hogy ezen épületek a jelenlegi formájukban és a jelenleg Magyarországon általánosan használt építési, kivitelezési eljárásokkal megvalósítva rendkívüli módon rontják a környezetük lokális klimatikus viszonyait. Amint a forró pontok elemzéséből is kiderült, az ilyen épületek olyan rendkívül magas mértékű hőterhelést rónak a környezetükre, mely funkciójukkal egyáltalán nem és méreteikkel is csak részben magyarázható. Az Arena Plaza esetében meg kell említeni, hogy az elhelyezése kifejezetten szerencsétlen módon történt, egy jelentős kulturális, történeti és zöldfelületi értékekkel bíró intézmény (az egykori Ügető) rovására. Nagyobb léptékben tekintve a dolgot a tágabb környezet hőháztartására is rendkívül rossz hatással van, hiszen míg az Ügető korábban egyfajta pufferzónaként is viselkedett hőháztartási szempontból a Keleti pályaudvar vasúti területei és a Kerepesi temető idős, értékes növényállománya között, addig most épp ellenkezőleg, az Arena Plaza nem hogy védené ezt az igen értékes zöldfelületet az ipari terület hatásaitól, hanem sokkal intenzívebb és közelebbi hőterhelést jelent a temető növényzete számára. Ezen fokozott terhelést tovább növeli az a tény, hogy a

Plaza épületgépészeti berendezései mind a temető felé eső oldalon lettek elhelyezve.

Budapest zöldfelületi rendszerének, melynek elemei gyakorlatilag már a XX. sz. elejére kialakultak [Csepely-Knorr, 2011a, 188-191. o.], egyik nagyon jelentős eleme a Kerepesi temető zöldfelülete. Ilyen mértékű beépítés a közvetlen környezetében, nem csupán a zöldfelületi rendszer további fejlesztését teszi majdhogynem lehetetlenné, hanem a jelenleg működő, már jó ideje kialakult zöldfelület károsodását is eredményezi hosszú távon.

Két további épületet célszerű még kiemelni, egyiket a vizsgált területről, ez az Papp László Budapest Sportréna épülete, mely teljes egészében fémborítású és szabályozott belső klímájú épület (ellentétben a például egyes raktárépületekkel, melyek ugyancsak fémborításúak, azonban fűtetlenek), a másik pedig a vizsgálati területtől nem messze a Fővám térnél található Corvinus Egyetem főépülete (Fővám palota) és az I. számú Vásárcsarnok épülete. Ez utóbbiak szintén több hektárt fednek le, részben üveg tetőlefedéssel, valamint szintén szabályozott belső klímával. A téli felvételen (2003.02.02.) (17. kép) jól látható a legforróbb pontokat ábrázoló képen, hogy ezen két épület a legmelegebb a vizsgált területen és azok környezetében is. Fontos kiemelnünk, hogy még a Dunánál is melegebbek, amely pedig a legmelegebb felülete általában a városnak téli időszakban. Tekintve ezt a hőmérsékleti anomáliát azt mondhatjuk, hogy ezen épületek felülete egész télen fagymentesnek tekinthető, ami elképesztő mértékű hőszennyezést feltételez. Mindennek oka egyrészt az épületek nagy mérete és az ebből következő nagy belső légtérfogat fűtési igénye, azonban ennél sokkal nagyobb probléma az alkalmazott tetőfedő anyagok minősége. Mind az üveg, mind pedig a fémborítás hőtechnikai szempontból rendkívül rossz mutatókkal bírnak, nagyon rossz a hőszigetelő képességük. A fém esetében a kifejezetten jó hővezető képesség rendkívül alacsony fajhővel (hőkapacitással) is párosul, míg az üvegborítás, mivel átlátszó, így nem csupán hőátadással, hanem jellemzően hőszugárzással is rendkívül nagymennyiségű hőt ad le. Megjegyzendő, hogy az átlátszó (ablak)üveg mind a látható fényt, mind a hőszugárzást csaknem teljesen átengedi, így nem csupán megvilágítását, hanem adott esetben a hűtését is eredményezi a belső tereknek. Részleges megoldást jelent a problémára hőszugárzást visszaverő fólia [Neufert et al. 2012, 103. o.] használata, azonban mindez nem befolyásolja lényegesen az üveg alapvetően rossz hőtechnikai tulajdonságait.

IV.4. A különböző vegetációs típusok hatása a városi hőháztartásra [Oláh, 2010c]

Ezen fejezetben a növényzet városok hőháztartására gyakorolt hatásával fogunk foglalkozni. A növényzet alapvetően három módon járulhat hozzá a városi hősziget mérsékléséhez. Az első maga a fotoszintézis, melynek során a bejövő sugárzási energia jelentős része nem hő-, hanem kémiai energiává alakul. A második a növény párologtatása, mely jelentős hűtő hatást eredményez annak környezetében. A harmadik, mely erősen összefügg a növényállomány színezettségével, az esetleges árnyékoló hatás. Nagy nyílt gyepfelületek esetében ennek nincs jelentősége, azonban egy zárt lombkoronaszint esetében a talajfelszín gyakorlatilag teljes mértékben árnyékolt, nincs kitéve a közvetlen napsugárzásnak, továbbá kialakul egy (néhány m, vagy néhány 10 m) vastag hűvösebb légréteg a talaj felett. A továbbiakban részletesen megvizsgálom, hogy a különböző vegetációs típusok hogyan hatnak ilyen esetekben a hőháztartásra, melyik milyen mértékben tudja mérsékelni a városi hőszigetet.

Fontos megjegyezni, hogy a műholdképek mindig az adott felszínről szolgáltatnak hőmérsékleti adatot, így zárt lombkoronaszint esetében a lombkorona felső részéről. Vagyis a felszíni hőmérsékletről ilyen esetben nem lehetnek közvetlen információink. Azonban, figyelembe véve az ilyen zárt lombkoronaszinttel rendelkező terület sugárzási viszonyait, valamint a sugárzási egyenleget, a következőket állíthatjuk: kialakul a földfelszín és a felső lombkoronaszint között egy néhány 10 m vastag levegőréteg, a földfelszínre jutó sugárzás töredéke a teljes bejövő sugárzásnak, valamint a sugárzás nagyobb része a felső lombkoronaszintben nyelődik el. Továbbá a teljes lombkoronaszint intenzíven párologtat ez esetben, míg a földfelszín jórészt árnyékolt, ennek alapján jogosan feltételezhető, hogy a földfelszínen mérhető hőmérséklet nem nagyobb, mint a felső lombkoronaszintben mérhető/detektálható felszínhőmérséklet. A továbbiakban zárt lombkoronatakaró esetén természetesen a mérési adatok mind a felső lombkoronaszint hőmérsékletét jelentik, amelyet a fentiek figyelembevételével, mint a felszínen mérhető hőmérséklet felső korlátját fogjuk tekinteni (ez vegetációs időszakban megtehető) és ebben az értelemben tárgyaljuk, mint az adott terület felszínhőmérsékletét.

A vizsgálati helyszín esetében (a Pesti-medence) a növényzet, a talaj és a domborzati viszonyok is rendkívül változatosak, több tájegység is található ezen területen, az eredeti vegetáció ennek megfelelően szintén széles skálájú, a hegyvidéki bükköstől kezdve a dombsági tölgyesen, a karszterdőkön és az ártéri erdőkön át egészen a síkvidéki homoki tölgyesig terjed a paletta [Schmidt, 2003, 162-164. o.].

A pesti oldalon a jelenlegi növényzet gyakorlatilag teljes egészében telepített, összetételében pedig rendkívül jelentős mértékben eltér az eredeti, őshonos növényzettől.

Nagy jelentőségűek itt a homokos talajra telepített akácerdők, valamint a területen található patakok mellé telepített nyárfaerdők. Továbbá néhol megtalálhatóak az eredeti növényállományt is alkotó tölgyesek, a vizsgált zöldfelületek is ilyen fafajú növényállományok lesznek.

Négy, homogénnek tekinthető zöldfelülettel foglalkoztam. Az első egy meglehetősen fiatal (20 év körüli) nyárfaerdő a Szilas-patak mellett, a második egy idősebb (50 év körüli) akácos a XVI. kerületben, a harmadik szintén egy hasonló korú akácos a Határ út mellett (a IX. kerület és a XIX. kerület határán), a negyedik pedig a Farkaserdő, mely egy idősebb (60 év körüli) összefüggő síkvidéki tölgyes a város északi részén a IV. kerületben (23. kép). Ezen négy terület jól reprezentálja a város keleti felén található zöldfelületek faállományát, azonban a fent említett helyeken ezen állományok majdhogynem elegyetlenül megtalálhatóak, épp ezért az itteni vizsgálatokból az adott fafajok tulajdonságaira is következtetéseket lehet levonni, úgy hogy a domborzati hatást nem kell figyelembe venni.



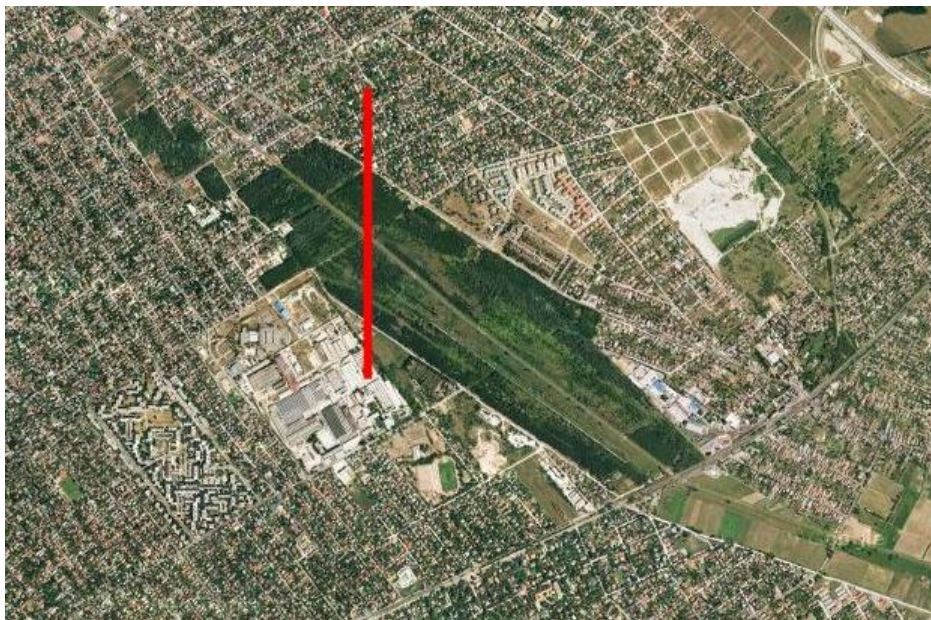
23. kép *A vizsgált zöldfelületek Budapesten*

4 db műholdképet vizsgáltam, ezek különböző időpontokban készültek Budapestről, két kora nyári és két késő tavaszi felvételtől van szó. Mivel a vegetáció hatásának a vizsgálata a cél, ezért ez esetben nem volt értelme téli képek elemzésének. A képek készítésének időpontjai a következők: 2001.07.06, 2002.05.04, 2006.06.18, és 2008.05.06. A négy területről a négy időpont alapján 16 db felvétel áll rendelkezésre, azonban különböző okokból (felhőborítottság két esetben, illetve a felvétel határának eltolódása miatt) csupán 12 db

értékelhető felvételünk van a 4 db területről. Az elemzés során ún. hőmérsékleti metszeteket készítettem, vagyis egy vonal mentén végighaladva vizsgáltam a jellemző hőmérsékleti eloszlásokat.

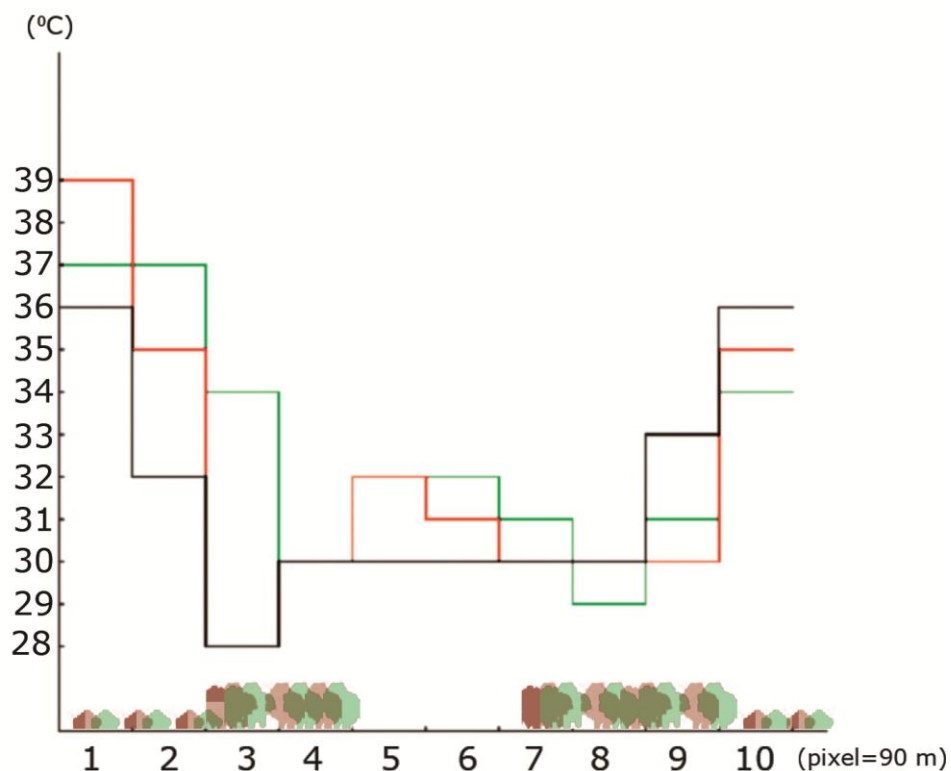
Szilas-patak menti nyárfaerdő (80 ha):

A terület a Szilas-patak mellett található a város keleti részén a XVI. kerületben (24. kép). Jellemzően 10-20 év közötti szürkenyár állomány (*Populus x canescens*) valamint néhol nyílt gyepek borítja. Fontos még megemlíteni, hogy mivel a Szilas-patak keresztül folyik ezen erdőn, ezért a fák vízellátottsága jónak minősül a relatív magas talajvízszint miatt, annak ellenére, hogy a területen egyáltalán nem történik öntözés.



24. kép ***A Szilas-patak menti erdő a metszetvonallal***

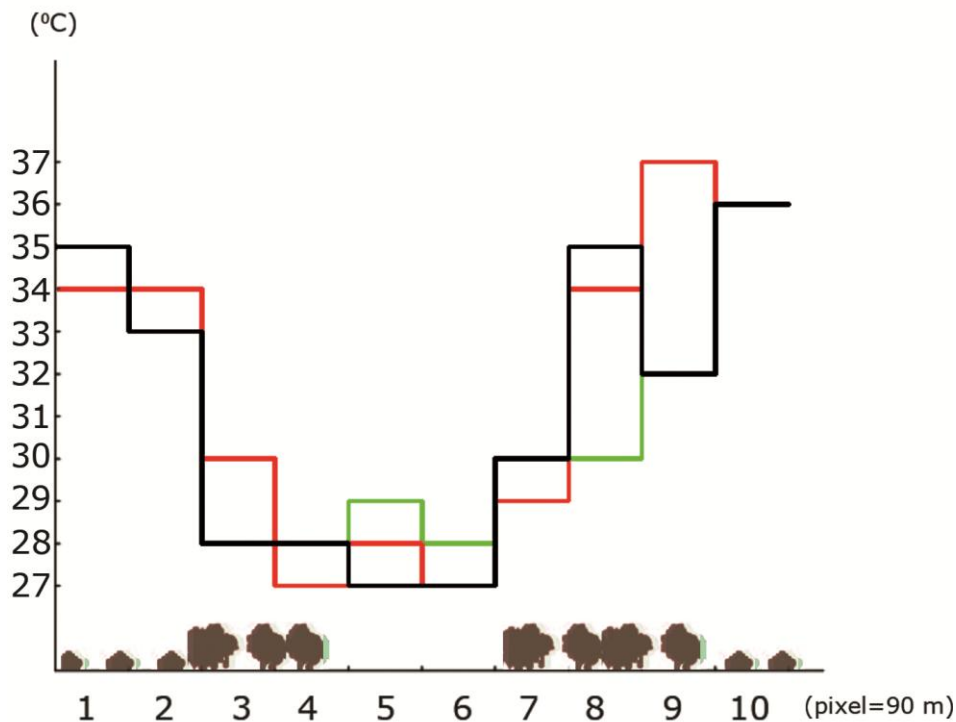
A 2001.07.06-os felvétel alapján készült hőmérsékleti metszet grafikon (14. diagram) alapján a következőt mondhatjuk: jól látható, hogy az erdő határain túl a beépített terület hőmérséklete jóval nagyobb, 35-37 °C-os, míg maga az erdő területe pedig csupán 28-31 °C-os. Fontos még megjegyezni, hogy a középső területen közvetlenül a patakparton egy keskenyebb gyepek sáv található és itt a várakozásnak megfelelően kissé magasabb a hőmérséklet (31 °C). Tehát ez esetben a családi házas beépített terület és a jó vízellátású nyárfaerdő között mintegy 6-7 °C hőmérsékletkülönbség tapasztalható.



14. diagram A Szilas-patak menti erdőről készült jellemző hőmérséklet eloszlás 2001.07.06-án. Az eloszlások alatt a jellemző felszíntípus látható, a különböző színek az egymás melletti keresztmetszeteket (szomszédos pixelsorokat) jelképezik.

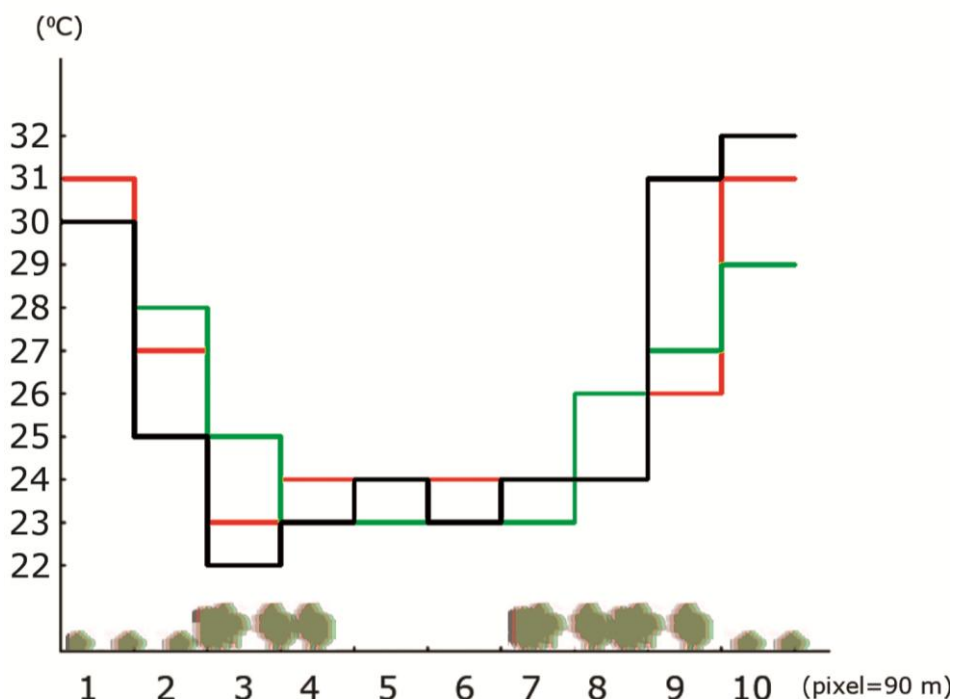
A 2002.05.04-es felvételen a Szilas-patak partja nem volt benne a szenzor látószögében.

A 2006.06.18-as felvétel elemzése (15. diagram) során a következőket állapíthatjuk meg: A környező területek hőmérséklete 33-37 °C-os, míg magának az erdőnek a területe pedig 26-29 °C-os, így a jellemző hőmérséklet különbség 7-8 °C, továbbá itt is jól megmutatkozik, hogy a középső gyepes sáv mintegy 2-3 °C-al melegebb az azt körülvevő erdős területnél.



15. diagram A Szilas-patak menti erdőről készült jellemző hőmérséklet eloszlás 2006.06.18-án. Az eloszlások alatt a jellemző felszíntípus látható, a különböző színek az egymás melletti keresztmetszeteket (szomszédos pixelsorokat) jelképezik.

Végezetül az utolsó, 2008.05.06-án készült felvétel elemzéséből (16. diagram) a következőt kaptuk: az előző két felvételhez hasonlóan az erdő területe itt is szignifikánsan hűvösebb a környező, beépített területeknél, valamint itt is látszik, hogy a gyepes terület valamivel (1-2 °C) melegebb a fásított részeknél. A környező területek hőmérséklete 29-31 °C, míg az erdő hőmérséklete pedig csupán 23-24 °C. Tehát az erdősített területek ez esetben is mintegy 6-7 °C-al hűvösebbek a környező területeknél.



16. diagram A Szilas-patak menti erdőről készült jellemző hőmérséklet eloszlás 2008.05.06-án. Az eloszlások alatt a jellemző felszíntípus látható, a különböző színek az egymás melletti keresztmetszeteket (szomszédos pixelsorokat) jelképezik.

A Szilas-patak melletti nyárfaerdő vizsgálatánál összességében elmondhatjuk, hogy az erdő hőmérséklete jellemzően 6-7 °C-al alacsonyabb a környező kertvárosias beépítésű területekénél, valamint, hogy a gyepes terület jellemzően 1-3 °C-kal melegebb az erdősült területeknél, annak ellenére, hogy a gyepnek a legjobb a vízellátottsága, valamint itt még a szabad vízfelület hűtő hatása is jelentkezik.

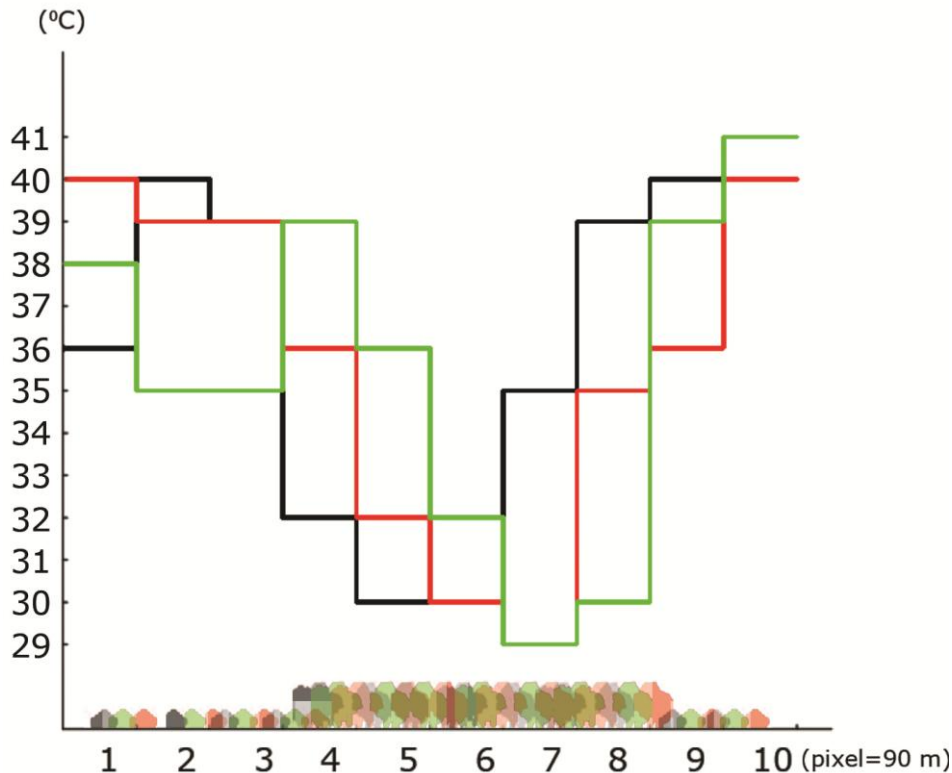
A kisméretű akácerdő (10 ha) a XVI. kerületben:

Egy kisméretű telepített akácerdőről (*Robinia pseudoacacia*) van szó, amely mintegy 40-50 éves, nem túl jó minőségű homokos talajon él, a talajvíz szintje viszont meglehetősen magas a Rákos-patak közelsége miatt. A zöldfelületek jelentős része a pesti oldalon ilyen típusú vegetáció (25. kép).



25. kép A XVI. kerületi kiserdő a metszetvonallal

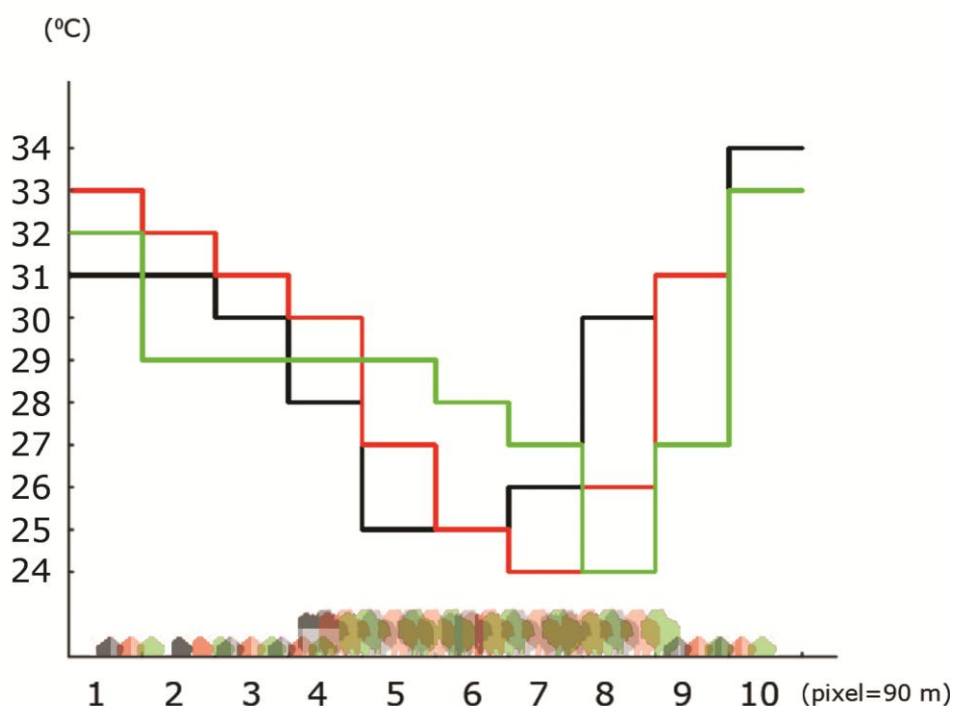
A 2001.07.06-ai infravörös felvétel feldolgozásakor készült hőmérsékleti metszet grafikonon (17. diagram) alapján a következőket állapíthatjuk meg: az erdős terület hőmérséklete 29-30 °C-os, míg a mellette található kertvárosias beépítésű területek pedig 35-40 °C-osak. A különböző grafikonok minimuma kissé eltér, ez az erdő kis méretével magyarázható. A hőmérséklet-különbség ez esetben mintegy 6-10 °C.



17. diagram: A XVI. kerületi kiserdőről készült jellemző hőmérséklet eloszlás 2001.07.06-án. Az eloszlások alatt a jellemző felszíntípus látható, a különböző színek az egymás melletti keresztmetszeteket (szomszédos pixelsorokat) jelképezik.

A 2002.05.04-ei felvételnél ez a terület is kívül esett a szenzor látómezején, a 2006.06.18-ai esetben pedig felhőborítás miatt nem lehetett értékelhető információt szerezni erről a zöldfelületről.

A 2008.05.06-ai felvételen azonban már ismét tisztán látszott a szóban forgó kiserdő. Ezen a felvételen a feldolgozás során a következőket tapasztalhattuk: a 3 párhuzamos grafikonon (18. diagram) a hőmérséklet eloszlások minimuma ismét eltér egymástól, hasonlóan az előző grafikonhoz, amely ismét bizonyítja, hogy ilyen kis méreteknél a 90 m-es távolságok már sokat számítanak. Az erdő belső területein a hőmérséklet ezúttal 24-25 °C, míg a határoló beépített területeken 29-33 °C. Így az erdő mintegy 5-8 °C-al hűvösebb, mint a környező kertvárosias területek.



18. diagram A XVI. kerületi kiserdőről készült jellemző hőmérséklet eloszlás 2008.05.06-án. Az eloszlások alatt a jellemző felszíntípus látható, a különböző színek az egymás melletti keresztmetszeteket (szomszédos pixelsorokat) jelképezik.

A XVI. kerületi kiserdő esetében elmondhatjuk, hogy annak hőmérséklete mintegy 5-10 °C-al volt hűvösebb a környező területeknél és ez esetben a hűtő hatás érezhetően nagyobb volt a nyári melegebb időszakban (mintegy 2 °C-al), mint a tavaszi esetben.

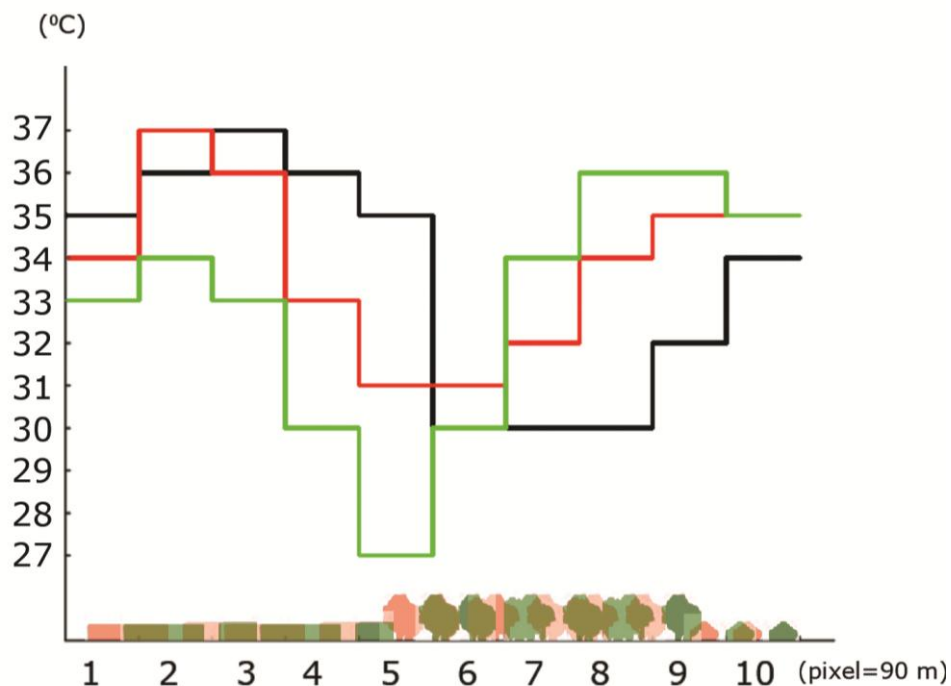
A Határ út melletti akácerdő sáv a IX. és a XIX. kerület határán

A XX. sz. első felében ez volt az akkori főváros határa, így egy már jó ideje beerdősített területről van szó. Az állomány életkora hasonló az előzőleg tárgyalt kisebb erdőéhez, azonban itt a talajvíz szintje jóval alacsonyabb. Az erdősáv szélessége változó, mintegy 200-300 m (26. kép).



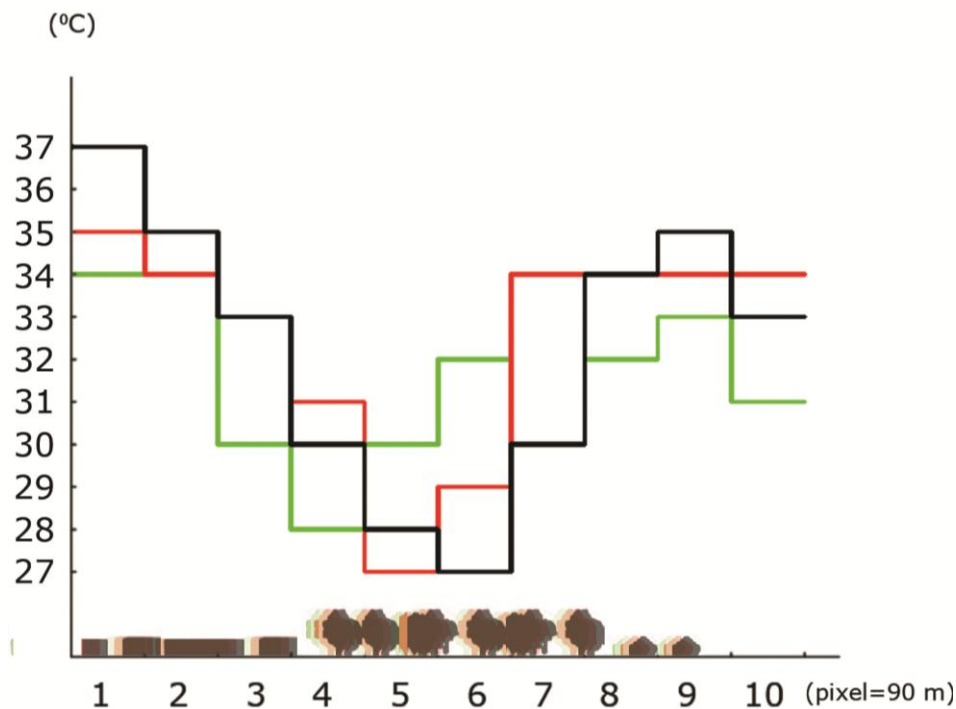
26. kép A Határ úti erdősáv a metszetvonallal

A 2001.07.06-ai felvétel elemzése (19. diagram) alapján a következőt állapíthatjuk meg: az erdősáv hőmérséklete 27-31 °C volt, míg a határoló kertvárosias, illetve barnamezős területeké pedig 33-38 °C. Vagyis ez esetben a jellemző hőmérséklet különbség mintegy 6-7 °C volt, azonban az értékek itt nagyobb térbeli szórást mutatnak, mint az előző esetekben.



19. diagram A Határ úti erdősávról készült jellemző hőmérséklet eloszlás 2001.07.06-án. Az eloszlások alatt a jellemző felszíntípus látható, a különböző színek az egymás melletti keresztmetszeteket (szomszédos pixelsorokat) jelképezik.

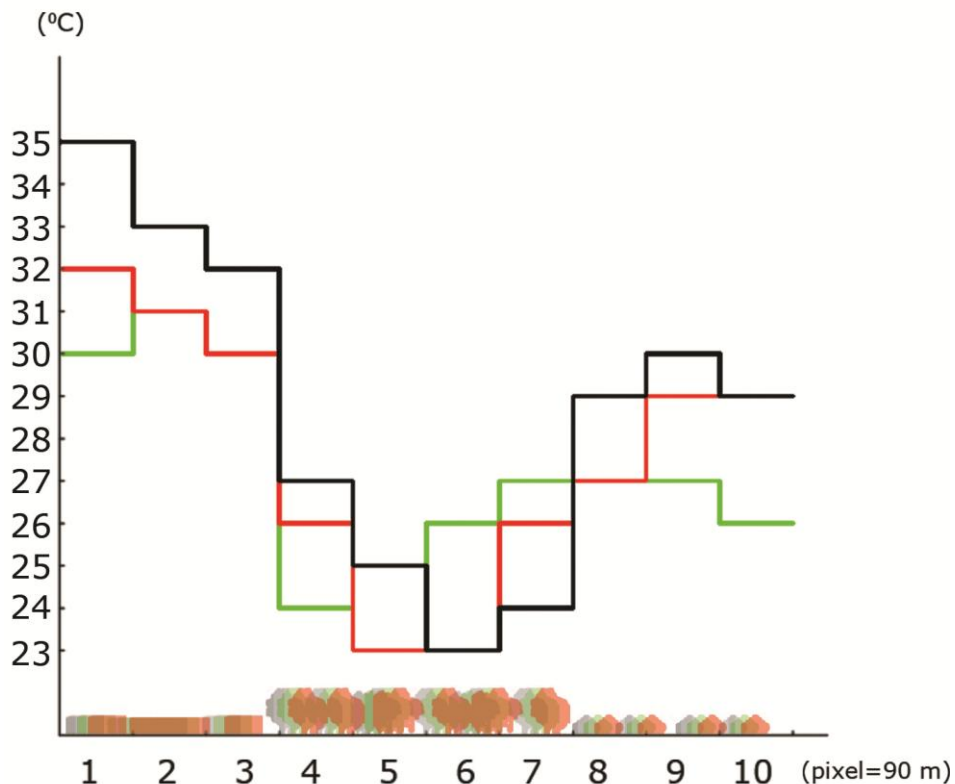
A 2002.05.04-ei felvétel elemzése során készített hőmérsékleti metszetek grafikonjából (20. diagram) a következőket állapíthatjuk meg: az egyes grafikonok minimumértékei itt is eltérnek egymástól, mind értékben, mind térben máshová esnek. Összességében az erdős terület hőmérséklete 27-29 °C, míg a határoló területeké pedig 31-37 °C. Az erdősített terület így mintegy 4-8 °C-al hűvösebb a szomszédos, beépített területeknél.



20. diagram A Határ úti erdősávról készült jellemző hőmérséklet eloszlás 2002.05.04-én. Az eloszlások alatt a jellemző felszíntípus látható, a különböző színek az egymás melletti keresztmetszeteket (szomszédos pixelsorokat) jelképezik.

A 2006.06.18-ai felvételnél a vizsgálandó területről nem tudtunk érdemleges információt szerezni felhőborítottság miatt.

A 2008.05.06-ai felvétel feldolgozása (21. diagram) során a következőket tapasztaltuk: az erdősült terület hőmérséklete 23-24 °C, míg a szomszédos kertvárosias lakóterületé 26-30 °C és a másik oldalon található barnamezős területé szignifikánsan még magasabb, 30-35 °C. Így az erdősáv hőmérséklete 3-6 °C-al alacsonyabb, mint a szomszédos kertvárosias lakóterületé és 7-11 °C-al (!), mint a szomszédos barnamezős területé.



21. diagram *A Határ úti erdősávról készült jellemző hőmérséklet eloszlás 2008.05.06-án. Az eloszlások alatt a jellemző felszíntípus látható, a különböző színek az egymás melletti keresztmetszeteket (szomszédos pixelsorokat) jelképezik.*

A Határ út mellett található erdősáv esetében, összességében a következő mondható el: az erdősült terület hőmérséklete ez esetben is szignifikánsan kisebb, mint a környező területeké. A határoló területeknél jelentkezik egy jellemző eltérés, miszerint a barnamezős területek jellemzően melegebbnek bizonyulnak a kertvárosias lakóterületnél [Oláh, 2010a]. Általánosságban elmondható, hogy az erdős területek hőmérséklete mintegy 3-8 °C-al alacsonyabb, mint a szomszédos kertvárosias lakóterületé, a barnamezős területtel összevetve pedig a különbség még sokkal nagyobb. Továbbá meg kell jegyezni, hogy ezen hőmérséklet-különbségek igen nagy változatosságot mutatnak mind térben, mind pedig évszakok szerint.

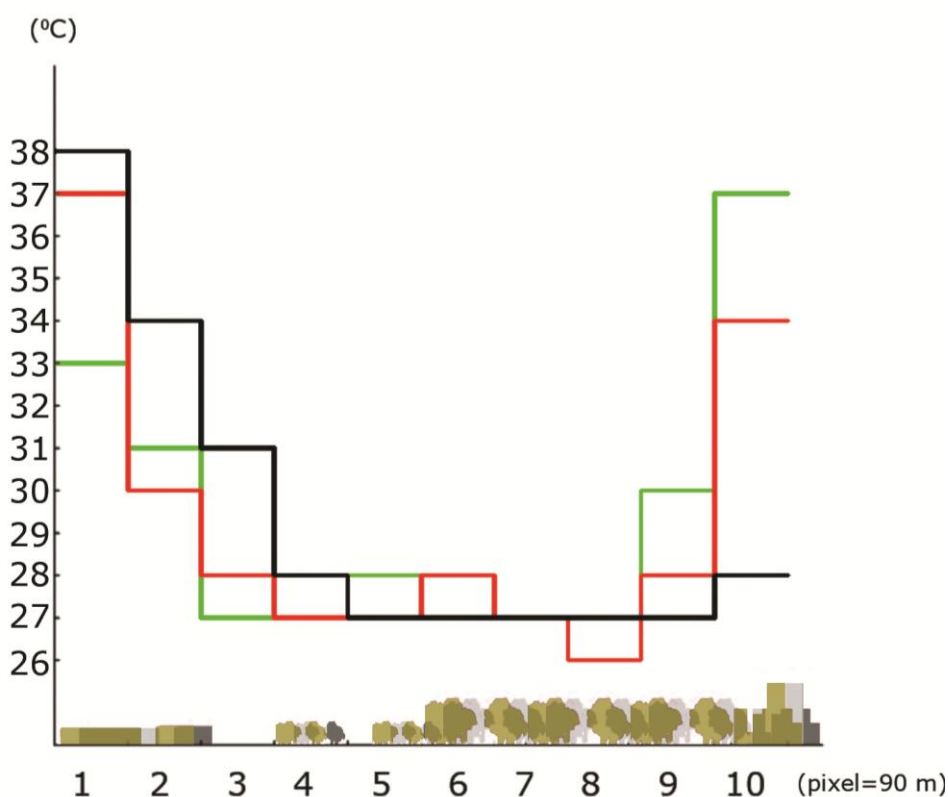
A Farkaserdő (100 ha) a IV. kerületben

A Farkaserdőt egy összefüggő, mintegy 60 év átlagéletkorú tölgyerdő alkotja, a szomszédjában pedig lakótelepek, illetve új építésű kertvárosias lakóterületek találhatóak. A talaj alapvetően homokos, azonban a talajvíz elérhető közelségben van (főleg a kocsányos tölgyek számára) a Duna viszonylagos közelsége miatt (27. kép).



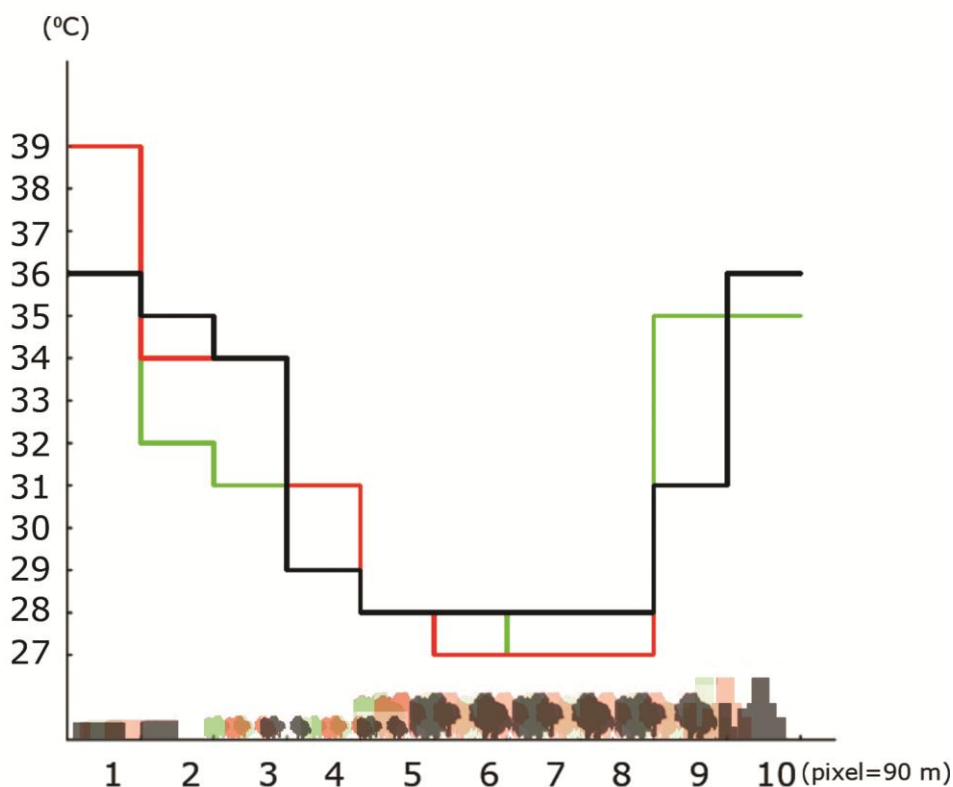
27. Kép *A Farkaserdő a metszetvonallal*

A 2001.07.06-ai felvétel alapján készült hőmérsékleti metszetsor (22. diagram) a következőket mutatja: Az erdő területe relatíve nagyon hűvös, 26-28 °C-os, a hőmérséklet csupán azon a területen megy fel 30 °C-ra, ahol a lombkorona borítottság nem folytonos. A szoszédos kertvárosias ill. lakótelepi beépítésű területek 35-40 °C-osak, így a jellemző hőmérséklet-különbség mintegy 9-12 °C (!).



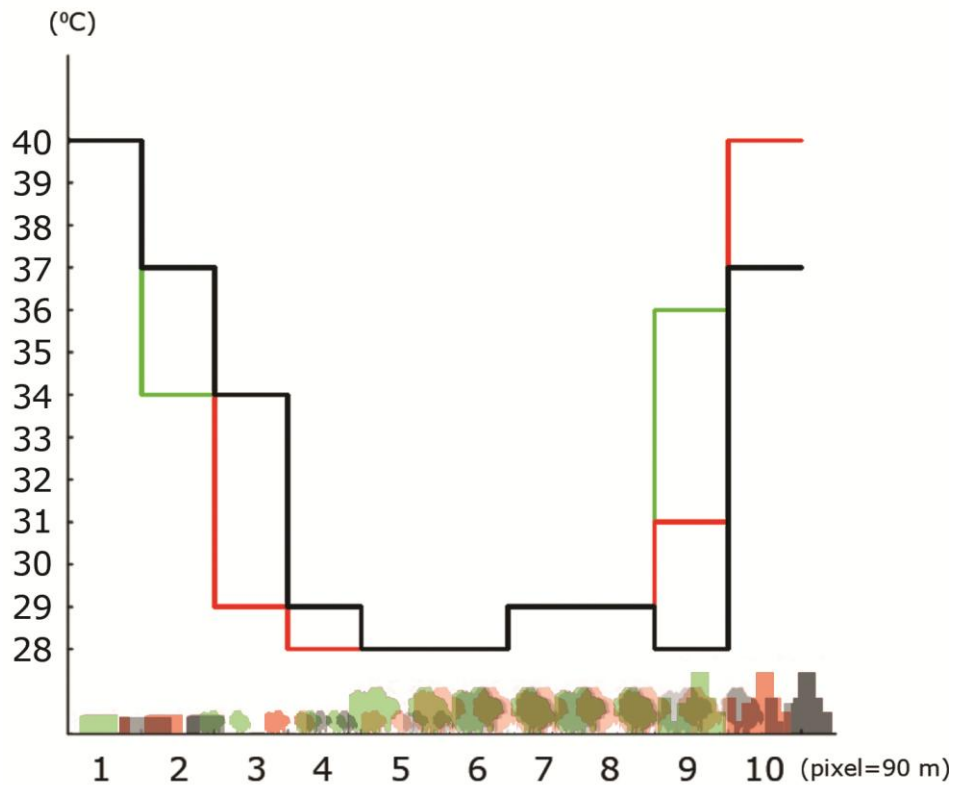
22. diagram: *A Farkaserdőről készült jellemző hőmérséklet eloszlás 2001.07.06-án. Az eloszlások alatt a jellemző felszíntípus látható, a különböző színek az egymás melletti keresztmetszeteket (szomszédos pixelsorokat) jelképezik.*

A 2002.05.04-ei műholdkép feldolgozása (23. diagram) alapján a következőkre jutottam: az erdő területének hőmérséklete mintegy 27-29 °C, itt is látszik, hogy ahol a lombkoronaszint nem folytonos, ott mintegy 2-4 °C-al magasabb a hőmérséklet. A környező lakóterületek hőmérséklete 35-41 °C körül alakul. Így az erdő mintegy 8-12 °C-al hűvösebb (!), mint a környező, beépített területek.



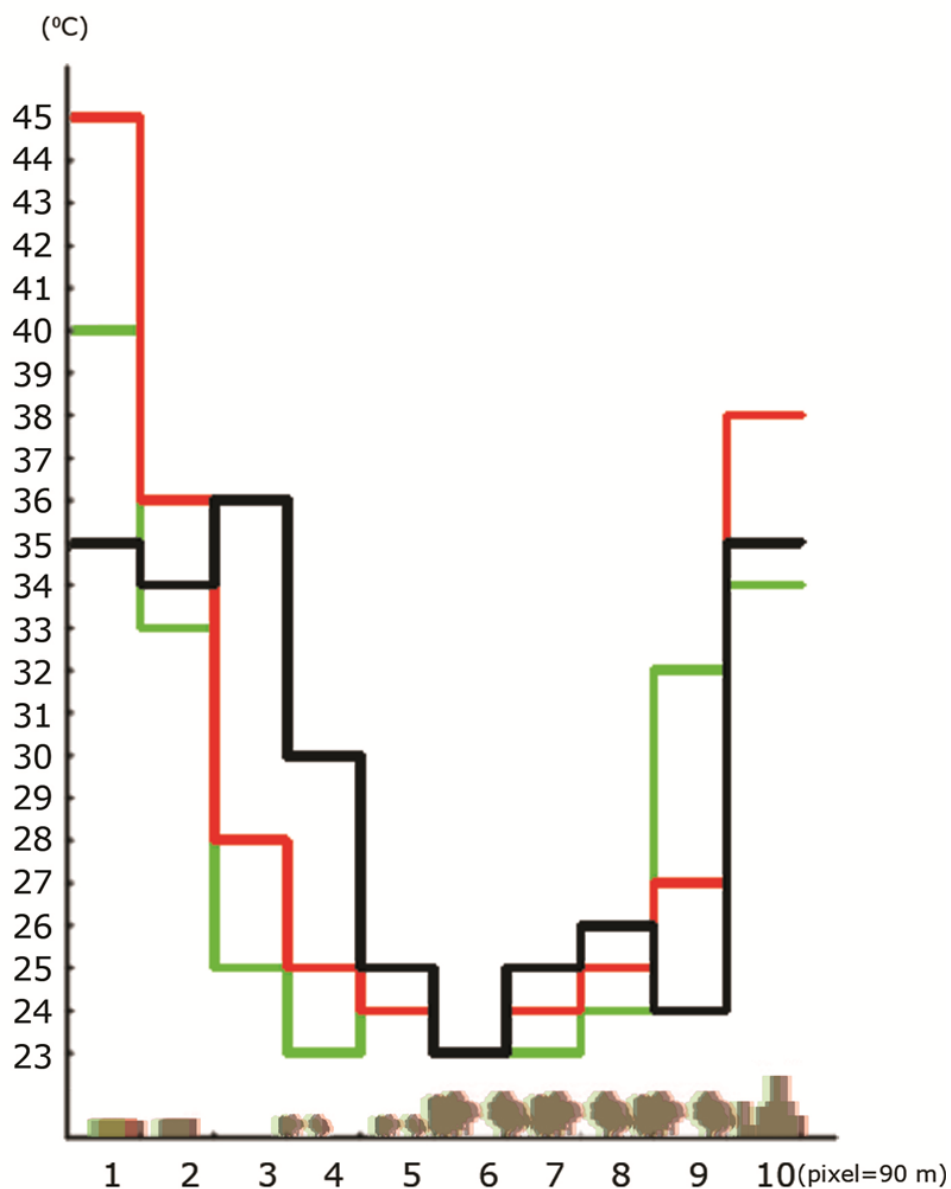
23. diagram A Farkaserdőről készült jellemző hőmérséklet eloszlás 2002.05.04-én. Az eloszlások alatt a jellemző felszíntípus látható, a különböző színek az egymás melletti keresztmetszeteket (szomszédos pixelsorokat) jelképezik.

A 2006.06.18-ai infravörös felvétel feldolgozása során a következő megállapításokra jutottam (24. diagram): az erdős területek hőmérséklete jellemzően 28-29 °C, míg a környező területeké pedig 35-41 °C, vagyis a jellemző hőmérséklet-különbség 7-12 °C. Ezúttal nem volt lényeges eltérés a teljes és a részleges lombkorona-borítottságú területek között.



24. diagram A Farkaserdőről készült jellemző hőmérséklet eloszlás 2006.06.18-án. Az eloszlások alatt a jellemző felszíntípus látható, a különböző színek az egymás melletti keresztmetszeteket (szomszédos pixelsorokat) jelképezik.

Végezetül, a 2008.05.06-ai műholdfelvétel elemzése során a következő eredményekre jutottam (25. diagram): az erdő területének hőmérséklete mintegy 23-26 °C volt, míg a szomszédos lakóterületeké pedig mintegy 35-44(!) °C. Az alacsonyabb lombkorona borítottságú részek itt sem bizonyultak melegebbnek. A hőmérséklet-különbség ez esetben 11-18(!!!) °C volt.



25. diagram A Farkaserdőről készült jellemző hőmérséklet eloszlás 2008.05.06-án. Az eloszlások alatt a jellemző felszíntípus látható, a különböző színek az egymás melletti keresztmetszeteket (szomszédos pixelsorokat) jelképezik.

Összefoglalva, a Farkaserdő elemzése során az tapasztalható, hogy ezen idősebb erdő esetében, melynek állománya jórészt összefüggő tölgyes, valamint a gyökerek már biztosan elérték a talajvizet, a jellemző hőmérséklet-különbség a környező lakóterületekhez képest, a többi zöldfelülettel összehasonlítva a legmagasabb, mintegy 7-18 °C (!).

Vizsgálva a különböző típusú növényállományokat és azok hőmérsékleti eloszlásra és hőháztartásra gyakorolt hatását, több igen érdekes eredményre jutottunk. A Szilas-patak melletti fiatal nyárfaerdő esetében elmondható, hogy egy ilyen fiatal erdőnek is már jelentős hőmérséklet mérséklő hatása van, különösen, hogyha jó vízellátottságú. A szignifikáns 6-7 °C-os, jelentős mértékű hűtő hatásban nyilván az is jelentős szerepet játszik, hogy a fő fafaj a

szürkenyár (*Populus x canescens*), hiszen a nyárfákról köztudott, hogy rendkívüli mértékben képesek párologtatni, amennyiben ehhez a megfelelő vízellátás a rendelkezésükre áll.

További fontos, ámde kissé meglepő eredmény az a kisebb anomália, amely szintén ezen a vizsgálati területen volt megfigyelhető. Amint az eredményeknél leírtuk, a közvetlenül a patak mellett található gyepes területek hőmérséklete jellemzően magasabb volt néhány fokkal, mint az erdős területé, holott itt a gyepek is rendkívül jó a vízellátása. Mindez annak bizonyítéka, hogy a többszintes növényállomány párologtató hatása, valamint hogy a talajfelszín nem éri direkt napsugárzás azt eredményezi, hogy kialakulhat egy hűvös légréteg a zárt lombtakaró és a talajfelszín között, ami igen nagy fontossággal bír egy adott terület hőháztartásában.

A XVI. kerületi kis akácerdő (*Robinia pseudoacacia*) esetében először meglepő volt, hogy gyakorlatilag majdnem ugyanolyan hatásra képes, mint a Szilas-patak melletti nyárfaerdő, hiszen a nyárfákról köztudott, hogy igen intenzíven párologtatnak, míg az akácerdők épp ellenkezőleg: képesek csökkenteni a párologtatásuk mértékét, amennyiben azt a körülmények indokolják. Azonban két dolog is magyarázza, hogy miért ért el ez esetben az akácos is hasonló hűtő hatást, mint az előzőekben említett fiatal nyaras.

Az első ilyen tényező a talajvíz szintje. Bár a szóban forgó kis akácos homokos talajon él, azonban a talajvíz szintje mégis magas, a közelben folyó Rákos-patak miatt. Így a kellő vízellátás mellett az akácerdő is intenzíven párologtat, nincs relatív vízhiány, ami miatt csökkenne a párologtatás mértéke és ezáltal a hűtő hatás.

A másik dolog, ami magyarázhatja a kondicionáló hatás ilyen mértékét, az a faállomány korában és méretében keresendő. A fiatal nyárfás változó magasságú, 10-20 m magas állományt alkotott, azonban ez az idős akácerdő már egyöntetűen a teljes területén elérte a végleges 20 m körüli magasságát. Így az a hűvösebb árnyékolt zóna is vastagabb, legalább 20 m magas, ami magyarázza a nem várt mértékű hűtő hatást.

Ezek alapján azt mondhatjuk, hogy a párologtatás mértékén túl a növényállomány fizikai szerkezete (magasság, lombkorona-borítottság, árnyékolás mértéke, színezettség) legalább olyan fontos lehet.

A legkevesebb meglepetéssel a Határ út melletti erdősáv szolgált, melynek állománya szintén túlnyomó részt fehér akácból (*Robinia pseudoacacia*) állt. Itt a talajvíz szintje a legalacsonyabb a vizsgált területek közül, az akácállomány, bár idős és jól fejlett, a meglehetősen szegényes vízellátás miatt jóval kevesebbet párologtat, mint az előző állomány, és ez a jelenség érződik is a hőmérsékletre gyakorolt hatásban, vagyis némely esetben az összefüggő erdőállomány csupán 3 °C-al volt hűvösebb, mint a szomszédos, már idős, nagyméretű faállománnyal rendelkező kertvárosias lakóterület.

A hűtő hatás ilyen alacsony szintjében még szerepet játszhat a geometriája az erdőterületnek, mivel egy viszonylag keskeny sávról van szó, amely ráadásul egy barnamezős ipari terület mellett húzódik, mely jelentős mértékű hőterhelést ró napsütéses időszakokban a szóban forgó növényállományra. Mindazonáltal ez a 3 °C-os hűtő hatás is jelentős lehet bizonyos esetben, főleg, ha az árnyékoló hatással is párosul, csupán a többi vizsgált terület hatásához képest tűnhet szerénynek.

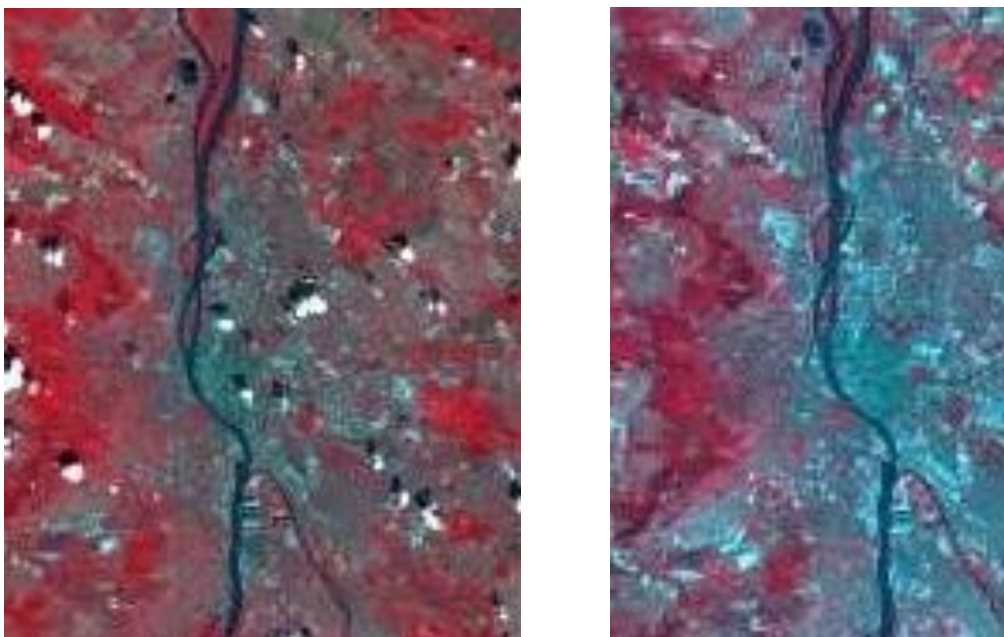
Végezetül meg kell említenünk a Farkaserdőt, ahol minden tényező együtt található a lehető legnagyobb hőmérséklet mérséklő hatás kialakulásához. Először is bár a talaj homokos, a talajvíz elérhető mélységben van az adott növényzet számára. Másodszor az adott növényzet legfőbb faja a kocsányos tölgy (*Quercus robur*) mely bár igen tágtűrésű (jól bírja a szárazságot és a rossz talajt), amennyiben kellő mennyiségű víz áll a rendelkezésére, úgy szintén rendkívüli mértékben párologtat és ezáltal hűti a környezetét. A harmadik igen fontos tényező pedig a növényállomány kora és ebből következően a szerkezete és rétegzettsége. A mintegy 60 éves zárt tölgyes nagyjából egyöntetűen 30 m magasságú és több lombkorona szint található benne.

Vagyis, mind a fafaj, mind a vízellátás, mind pedig a növényállomány fizikai szerkezete a lehető legnagyobb mértékű hűtő hatás elérését teszi lehetővé, ennek megfelelően az erdő mintegy 7-18 °C-al volt hűvösebb a környezeténél, ami átlagosan több mint 10 °C-os (!) hőmérsékletkülönbséget jelentett.

Összegezve elmondható, hogy rendkívül fontos a fafaj a kondicionáló hatás potenciális mértékének elérésekor. Valószínűleg, ha a XVI. kerületi kisméretű idős akácállomány helyén egy ugyanolyan korú tölgyállomány lenne, akkor ott is sokkal jelentősebb lenne a hőmérséklet mérséklő hatás. Érdekeség, hogy pont a Duna völgyében őshonos fafajok (fűz, nyár, tölgy, kőris, szil) azok, melyek képesek a lehető legnagyobb mértékben párologtatni és ugyanakkor mégis eléggé tágtűrésűek, hogy városi környezetben is alkalmazhatóak legyenek. A fafaj mellett legalább olyan fontos a megfelelő vízellátás. Mint láthattuk a Határ úti erdősáv példáján, alacsony talajvízszint esetében, öntözés híján a növényzet egész egyszerűen fizikailag képtelen annyit párologtatni és úgy fejlődni, hogy a lehető legjobb (fafajból adódó) hűtő, kondicionáló hatást tudja biztosítani. Legalább annyira fontos, mint az előző kettő, ha nem még fontosabb, a növényállomány megfelelő térbeli strukturáltsága, a több összefüggő lombkorona szint megléte és ezáltal egy hűvösebb, lehetőleg minél vastagabb felszíni légréteg kialakulása mindamellett, hogy a talajfelszínt nem éri direkt napsugárzás. Ahogy a Farkaserdőnél és a XVI. kerületi kis erdőnél láthattuk, az állomány kedvező térbeli szerkezete rendkívül jelentős további hatással bírhat, mely adott esetben a fafajválasztásból adódó hátrányokat is ki tudja küszöbölni.

IV.5. A vízfelületek hatása a városi hősziget szerkezetére [Csepely-Knorr et al., 2010; Oláh, 2010d]

Az egyik legjelentősebb klímamódosító hatású felszíntípus a vízfelület. Ahogy a bevezetőben már szó volt róla, az igazán nagy víztömegek a makroklímát is jelentősen képesek módosítani. Azonban, ahogy azt a hősziget kialakulásánál és a felszíni hőháztartás tárgyalásánál is láthattuk, a víz kisebb mértékű jelenléte is nagy hatással van a helyi klímára, amelynek a szerepe különösen fontos lehet városklíma esetében. A víz jelenléte közvetlenül mind a nagy fajhőjének, mind pedig a fázisátalakulásainál jelentkező, szintén nagy látens hőnek (párolgáshő) köszönhetően, valamint közvetve a növényi metabolizmuson és a felhőképződés miatt jelentkező felszíni sugárzáscsökkentésen keresztül is jelentősen befolyásolja az adott felszín hőháztartási viszonyait (ez utóbbi természetesen csupán nagyobb tengerek mellett jelentős). Mindenképpen célszerű ezért megvizsgálni Budapest esetében is a felszíni vizek hatását, annál is inkább mivel az eddigi elemzések is azt mutatták ki, hogy a vízfelületek azok, amelyek leginkább mérséklék a hőmérsékleti szélsőségeket, mind télen, mind pedig nyáron. Az elemzéshez fontos megemlítenünk, hogy ez esetben célszerű összevetni a közeli infravörös és a hőmérsékleti infravörös képeket. A közeli infravörös képek a fotoszintézis intenzitásáról, így ezen keresztül a biológiai aktivitás mértékéről adnak felvilágosítást. A közeli infravörös tartománya a spektrumnak az, amelyből a fotoszintetizáló növényzet a legtöbb sugárzást visszaveri (28. kép).



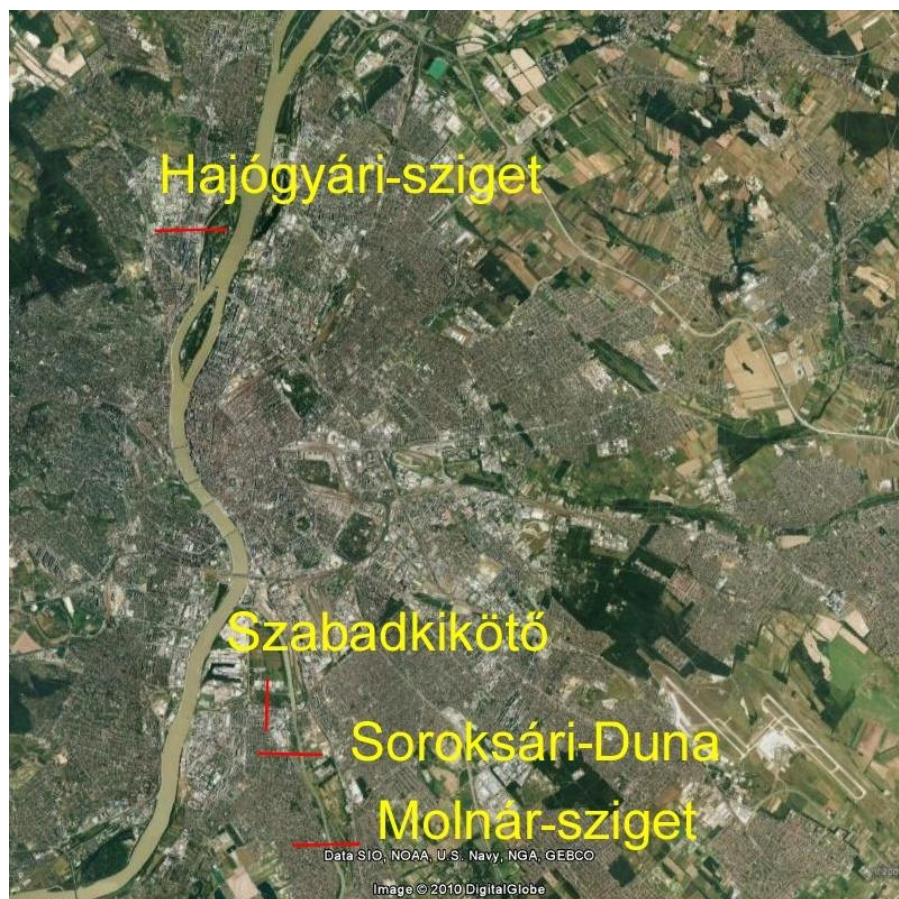
28. kép *Közeli infravörös (SWIR) műholdképek. A vörös szín a közeli infravörös sugárzás visszaverődését (növényzet), míg a kék annak elnyelését (mesterséges anyagú felület) reprezentálja.*

A közeli infravörös és a termális infravörös felvételek összevetéséből kitűnt, hogy a vizsgált napos, száraz meleg nyári időszakokban a termális és a közeli infravörös felvételek között nagyon erős a korreláció, a vízfelszíneket leszámítva az összefüggés arányosnak tekinthető. Vagyis minél hűvösebb egy felület a termális infravörös felvételen, annál nagyobb ott a fotoszintézis aktivitása (annál vörösebb a közeli infravörös felvételen).

A vízfelszínnek esetében értelemszerűen ugyanúgy nem történik fotoszintézis, mint egy mesterséges burkolt felszín esetében, ezért itt teljesen eltér a közeli és a termális infravörös műholdképek jellege. Azonban a víz egyéb anyagoktól radikálisan eltérő fizikai tulajdonságai (extrém nagy fajhő, párologtatás, radikálisan más hőhőztartás) valamint a fotoszintézist közvetetten befolyásoló tulajdonságai (vízparti jobb vízellátású növényzetnek nagyobb az aktivitása) miatt a termális infravörös képek jobban tükrözik a vízfelület városi ökoszisztémában betöltött szerepét és természetesen a városklímára gyakorolt hatását. Továbbá a városról készült térképek (pl. Google Earth felvételek) segítségével a vízfelületek helyzete és határai pontosan meghatározhatóak és világosan elkülöníthetőek a zöldfelületektől. Ennek megfelelően a továbbiakban a termális infravörös felvételeket elemezzük, a közeli infravörös felvételek pedig csupán ellenőrzésre szolgálnak.

Jelen vizsgálat során 4 darab nyári ill. késő tavaszi időpontban készült műholdképet elemeztem. A 4 időpont 2001.07.06-a, 2002.05.04-e, 2006.06.18-a és 2008.05.06-a volt.

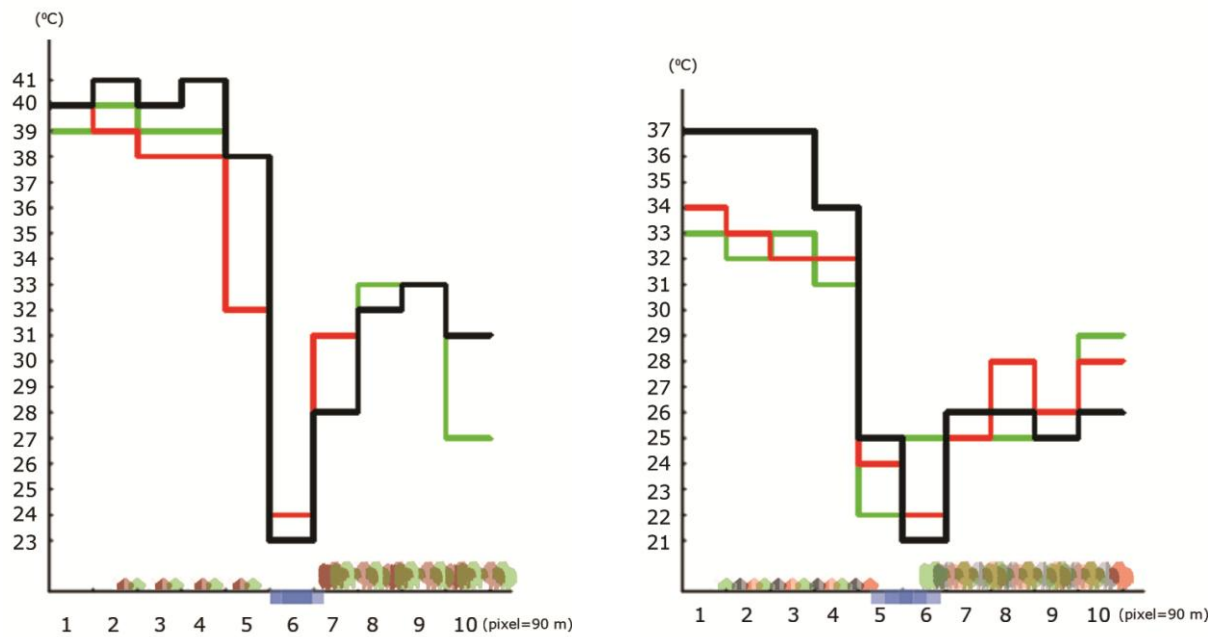
A különböző méretű vízfelületek hatásainak számításához megnéztük a Hajógyári-sziget melletti keskeny Duna-ág (kb. 60 m széles) felszínhőmérséklet eloszlását, valamint hasonlóképpen a Soroksári Duna-ágot (kb. 160 m széles), az abból nyíló Szabadkikötő (kb. 90 m széles) öblét, valamint a Soroksári Dunán lejjebb található Molnár-szigetet (kb. 20 m és kb. 100 m szélességű vízfelületek) (29. kép).



29. kép ***A vizsgált vízfelületek Budapesten***

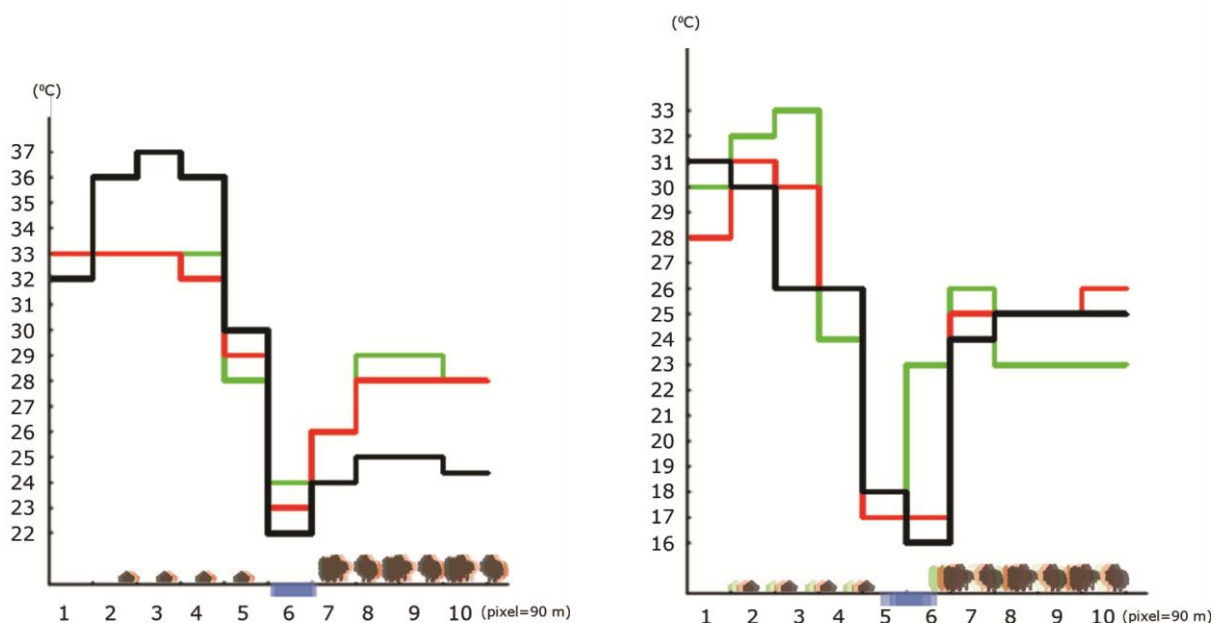
Hajógyári-sziget melletti Duna-ág (60 m széles)

Ezen vízfelületet nyugati oldalról a város III. kerülete (Óbuda) sűrűn beépített részei, keletről pedig a Hajógyári-sziget (mely ezen részen parkosított) határolja. A 2001 nyári hőmérsékleti eloszláson jól látszik, hogy a beépített terület 37-41 °C közötti, a sziget parkosított területe 30-33 °C-os, míg magának a vízfelületnek a hőmérséklete csupán 23-26 °C közötti (26. diagram).



26. diagram A Hajógyári-sziget melletti Duna-ág jellemző hőmérsékleti metszetei 2001.07.06-án és 2002.05.04-én. Az eloszlások alatt a jellemző felszíntípus látható, a különböző színek az egymás melletti keresztmetszeteket (szomszédos pixelsorokat) jelképezik.

A 2002-es tavaszi felvételen a beépített terület hőmérséklete 33 és 37 °C közötti, a parké 25-29 °C, a vízfelület pedig 21-24 °C (26. diagram). A 2006-os nyári és a 2008-as tavaszi felvételen is hasonló a helyzet (27. diagram), az előbbinél a beépített terület hőmérséklete 33-39 °C, a park hőmérséklete 27-30 °C, a vízfelületé pedig 22-23 °C. A 2008-as tavaszi esetben pedig a beépített terület 29-33 °C-os, a parkosított sziget 23-26 °C-os, míg a vízfelület 16-17 °C-os volt.



27. diagram A Hajógyári sziget melletti Duna-ág jellemző hőmérsékleti metszetei 2006.06.18-án és 2008.05.06-án. Az eloszlások alatt a jellemző felszíntípus látható, a különböző színek az egymás melletti keresztmetszeteket (szomszédos pixelsorokat) jelképezik.

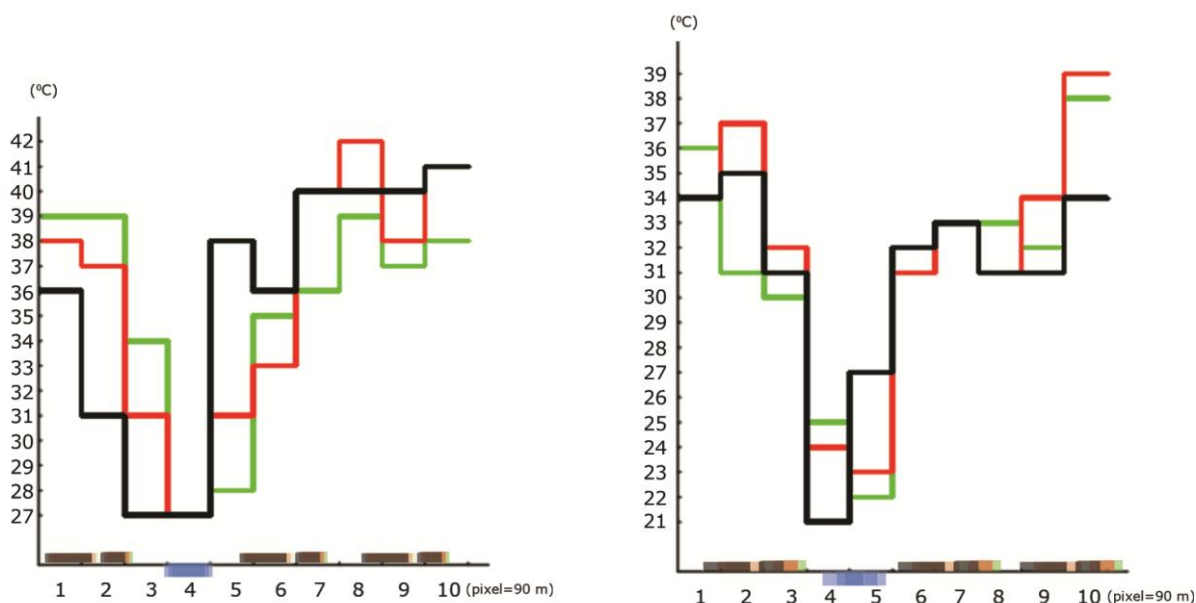
Összevetve a 4 különböző időben készült képet elmondható, hogy a beépített területeknél a parkosított zóna hőmérséklete szignifikánsan hűvösebb 6-8 °C-kal, míg a vízfelület még ehhez képest is hűvösebb további 5-6 °C-al. Meg kell említeni, hogy ezen parkos terület éppen a Duna miatt rendkívül jó vízellátású, éppen ezért igen magas a biológiai aktivitása és így a párologtató képessége is. Összességében tehát Budapesten egy 60 m széles lineáris vízfelület felszínhőmérséklete a mellette levő beépített területhez képest mintegy 11-14 °C-al lehet kevesebb napos, száraz, nyári vagy tavaszi időszakban.

Soroksári Duna-ág (160 m széles)

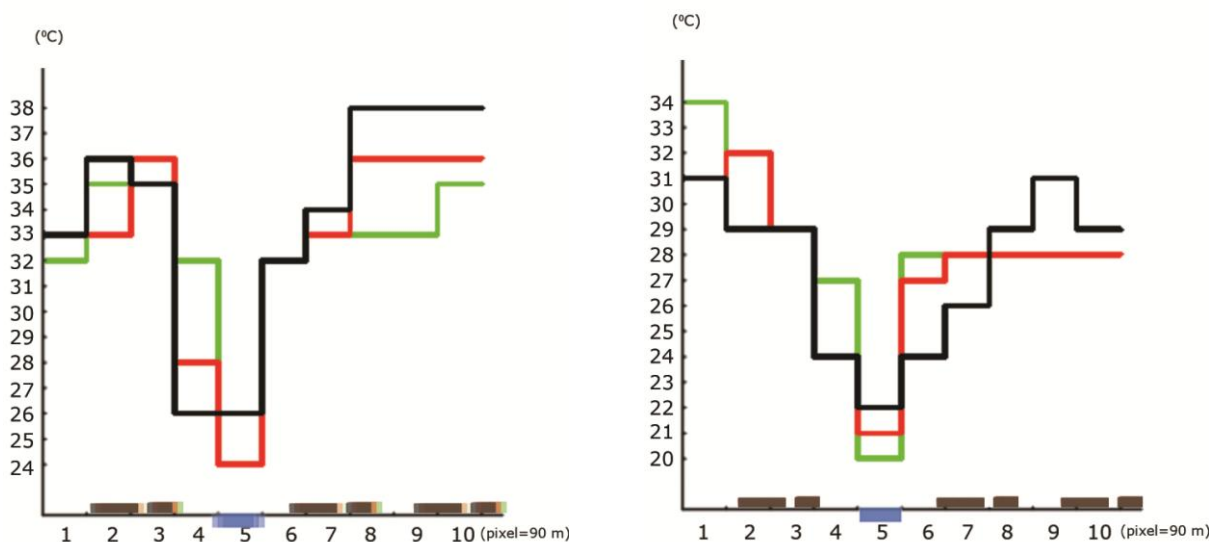
Ez a vízfelület a Duna főágától a Kvassay-zsilippel lett leválasztva, vízszintje így nagyjából állandó (hasonlóan egy csatornához). Nyugatról a Csepel-sziget, keletről pedig Pest déli része határolja, ezen határoló területek jellemzően vegyes használatú ill. átalakuló területek, változatos beépítéssel, szegényes növényzettel.

A 2001-es felvétel hőmérsékleti metszetén látszik (28. diagram), hogy a vízfelület hőmérséklete 27-28 °C-os, míg a parti területeké pedig 37-42 °C. A 2002-es tavaszi felvétel esetében (28. diagram) a vízfelület 21-24 °C-os, a környező területek pedig 33-37 °C-osak. A 2006-os felvételen (29. diagram) a vízfelület hőmérséklete 24-26 °C, a határoló területeké pedig 33-38 °C. Végezetül a 2008-as tavaszi képen (29. diagram) pedig a vízfelszín

hőmérséklete 20-24 °C-os, a környező területeké pedig 28-34 °C. Összességében elmondható, hogy ezen 160 m széles budapesti vízfelület átlagosan 8-12 °C-al hűvösebb az azt övező, hóháztartási szempontból átlagos városi területektől.



28. diagram A Soroksári-Duna jellemző hőmérsékleti metszetei 2001.07.06-án és 2002.05.04-én. Az eloszlások alatt a jellemző felszíntípus látható, a különböző színek az egymás melletti keresztmetszeteket (szomszédos pixelsorokat) jelképezik.



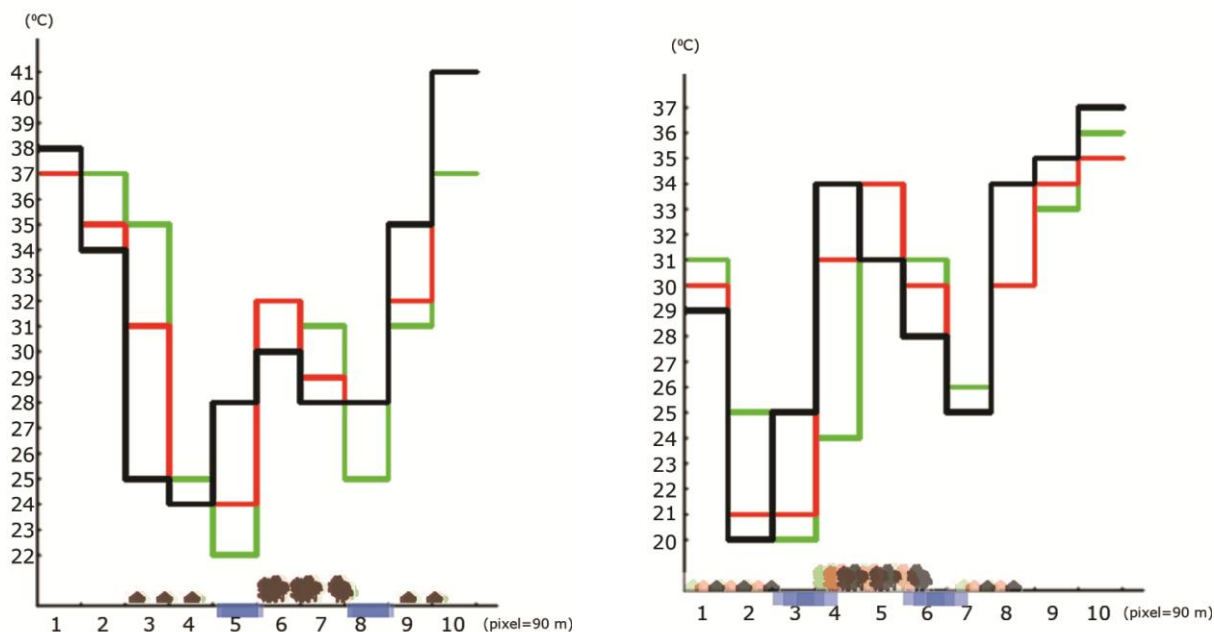
29. diagram A Soroksári-Duna jellemző hőmérsékleti metszetei 2006.06.18-án és 2008.05.06-án. Az eloszlások alatt a jellemző felszíntípus látható, a különböző színek az egymás melletti keresztmetszeteket (szomszédos pixelsorokat) jelképezik.

Molnár-sziget

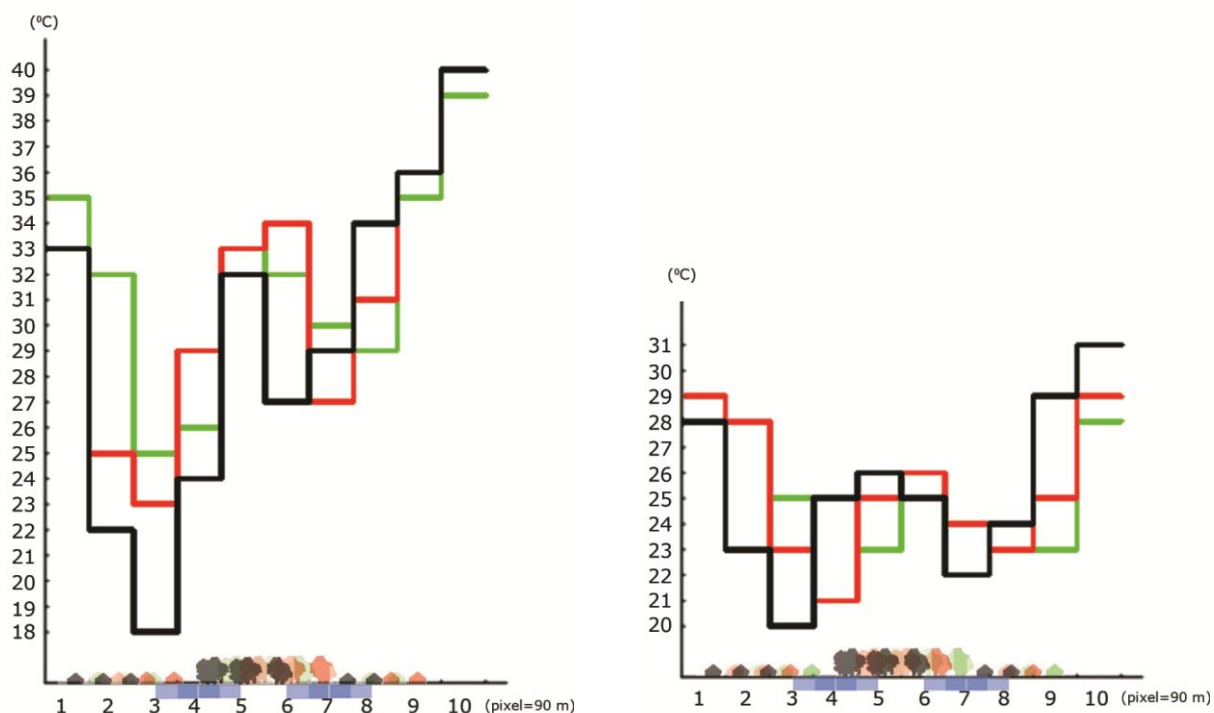
A soroksári Duna ágon lejjebb van egy kisebb sziget (Molnár-sziget), mely két további ágra osztja a folyót; az egyik ág mintegy 100 m, a másik pedig mintegy 20 m széles. Itt vizsgálva a hőmérsékleteloszlást össze tudjuk hasonlítani a különböző szélességű vízfelszínek hőháztartásra gyakorolt hatását. Magának a kis szigetnek a hőmérsékletét nagy mértékben temperálja a közeli vízfelületek hatása, így a szárazföldi területek jellemző hőmérsékleti adatait a két partot jellemző értékek tükrözik igazából. Továbbá meg kell jegyeznünk, hogy mivel az egyik ág csupán mintegy 20 m széles, az ottani hőmérsékleti értékek nem tekinthetők a tényleges vízhőmérsékleti értéknek, hanem a vízfelület hőmérsékletének és a parti területek hőmérsékletének valamely véletlenszerű átlagának, azonban mint kiderült, a hőmérséklet-eloszlás jellegében így is világosan megmutatkozik ezen keskeny vízfelület hatása a felvételek térbeli felbontóképességének korlátainak dacára.

A 2001-es felvételen (30. diagram) a szélesebb vízfelület hőmérséklete 22-25 °C, a keskenyebbé 27-29 °C, a partok hőmérséklete pedig 37-41 °C. A 2002-es felvételen (30. diagram) a szélesebb csatorna 20-21 °C-os, a keskenyebb 26-27°C-os, míg a környező területek 31-35 °C-osak. A 2006-os esetben (31. diagram) a szélesebb csatorna 18-25 °C-os, a keskenyebb pedig 29-30 °C-os, a parti területek hőmérséklete pedig 35-40 °C között mozog. A 2008-as tavaszi felvételen (31. diagram) is nagyon hasonló jellegű a hőmérséklet eloszlás, a szélesebb csatorna hőmérséklete 20-21 °C, a keskenyebbé 22-24 °C, a szomszédos területeké pedig 28-31 °C.

Következésképp egy 20 m széles vízfelület mintegy 5-8 °C-kal hűvösebb a környezeténél, míg egy 100 m szélességű pedig mintegy 11-16 °C-kal késő tavaszi-nyári időszakban derült napsütéses idő esetén.



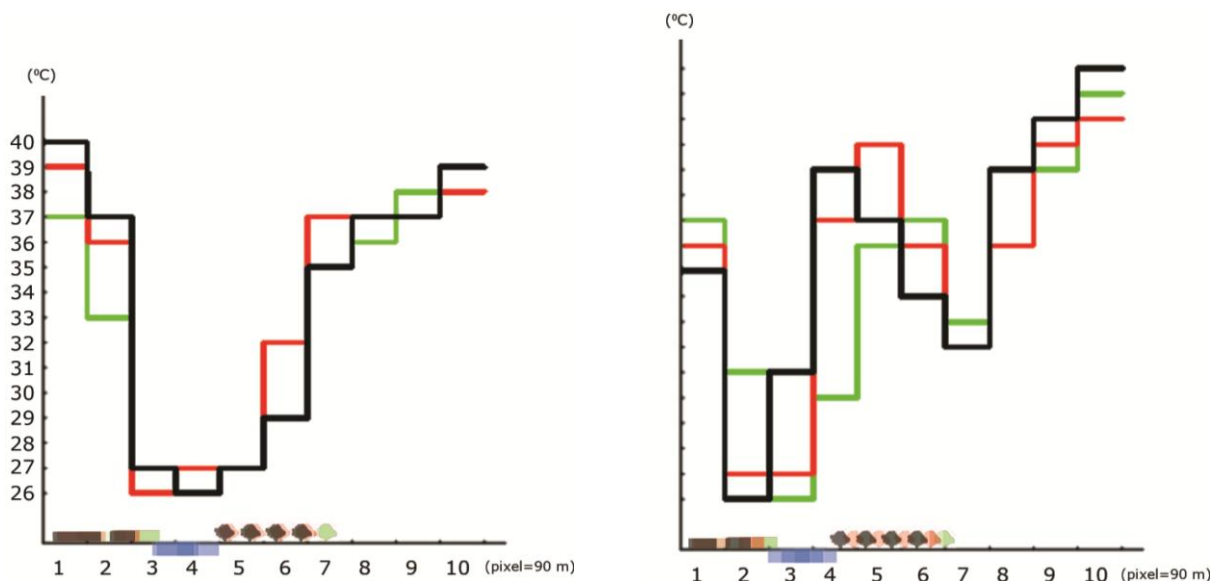
30. diagram A Molnár-sziget melletti Duna-ágak jellemző hőmérsékleti metszetei 2001.07.06-án és 2002.05.04-én. Az eloszlások alatt a jellemző felszíntípus látható, a különböző színek az egymás melletti keresztmetszeteket (szomszédos pixelsorokat) jelképezik.



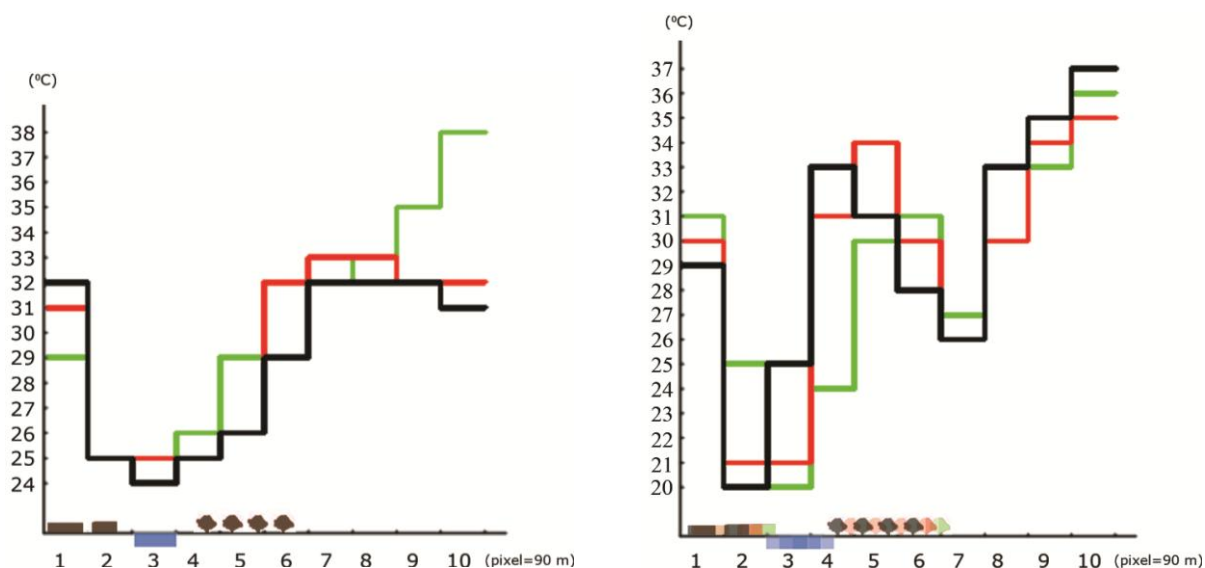
31. diagram A Molnár-sziget melletti Duna-ágak jellemző hőmérsékleti metszetei 2006.06.18-án és 2008.05.06-án. Az eloszlások alatt a jellemző felszíntípus látható, a különböző színek az egymás melletti keresztmetszeteket (szomszédos pixelsorokat) jelképezik.

Szabadkikötő

A szóban forgó vízfelület alapvetően a soroksári Duna ág egy mesterséges öble, mely mintegy 90 m széles. A 2001-es műholdkép alapján (32. diagram) a vízfelszín hőmérséklete 26-27 °C, a parti területeké pedig 36-40 °C. A 2002-es felvételen (32. diagram) a vízfelszín 24-25 °C-os, míg a környező területek 33-36 °C-osak. A 2006-os esetben (33. diagram) a kikötő vize 24-26 °C-os, a parti részek pedig 31-35 °C-osak. A 2008-as felvételen (33. diagram) pedig a vízfelület 21-23 °C-os, a környezete pedig 29-32 °C-os. Tehát a 4 felvétel alapján a Szabadkikötő vize átlagosan 7-13 °C-kal hűvösebb az azt körülvevő területeknél.



32. diagram A Szabadkikötő jellemző hőmérsékleti metszetei 2001.07.06-án és 2002.05.04-én. Az eloszlások alatt a jellemző felszíntípus látható, a különböző színek az egymás melletti keresztmetszeteket (szomszédos pixelsorokat) jelképezik.



33. diagram A Szabadkikötő jellemző hőmérsékleti metszetei 2006.06.18-án és 2008.05.06-án. Az eloszlások alatt a jellemző felszíntípus látható, a különböző színek az egymás melletti keresztmetszeteket (szomszédos pixelsorokat) jelképezik.

Összegezve elmondhatjuk, hogy a vízfelületek minden esetben jelentősen mérséklék környezetük hőmérsékletét. Ezen mérséklő hatás kiterjedése a szomszédos területhasználatoktól függően, közvetve akár több száz méter is lehet. Az adott lineáris vízfelület szélességétől függően a mérséklő hatás változik, akár már egy 20 m széles vízfelületnek is komoly városökológiai és városklimatológiai hatása lehet, főleg, ha ezen vízfelületet növényzet szegélyezi. Minél szélesebb a vízfelület, annál nagyobb a mérséklő hatás, azonban nem egyenesen arányos az összefüggés, ahogy nő a vízfelület szélessége, a mérséklő hatás egyre kevésbé növekszik. Minimális szélességet, méretet a műholdképek térbeli felbontóképessége miatt ezen tanulmányban nem tudunk adni, az mindenesetre tény, hogy egy ilyen minimális méret messze alatta van az általunk használt termális infravörös ASTER felvételek térbeli felbontóképességének. Mindazonáltal az elmondható, hogy klimatológiai szempontból kedvező, ha zöldfelület borítja a partokat.

IV.5. Az eredmények közvetlen felhasználhatósága, kiterjeszthetősége

Áttekintve a különböző vizsgálatok eredményeit, olyan konklúziókra is juthatunk, melyeket mindegyik vizsgálat alátámaszt. Az egyik legfontosabb az, hogy a különböző felülettípusokhoz pontosan hozzárendelhetők a nekik megfelelő hőmérsékletek az adott időjárási helyzetben.

A másik, ami szempontunkból szintén rendkívül fontos az az, hogy az adott felszínnek nem képesek érdemben befolyásolni a szomszédos felszínnek eltérő felszínhőmérsékletét. Természetesen a fenti eredményt csupán azzal a megszorítással állíthatjuk, amelyet az általunk elemzett felvételek felbontóképessége megenged, vagyis 90 m-nél nagyobb távhatásról egyáltalán nem lehet beszélni. Ugyanakkor természetesen mindez felszínhőmérsékletre vonatkozik, tehát a léghőmérséklet esetében nyilvánvalóan létrejön hűtő-, illetve fűtő hatás, mivel az eltérő hőmérsékletű szomszédos felszínnek nyilvánvalóan olyan légáramlást fognak indukálni, mely hőáramlást is eredményez.

Tehát az ilyen típusú "távhatás" elemzéséhez feltétlenül szükséges ismerni a felszínhőmérséklet és a léghőmérséklet kapcsolatát. A kapcsolat nem egzakt, különösen nem az olyan rendkívül összetett esetekben, mint amelyet egy városi felszín jelent. Az egyik irány, amelyen el lehetett indulni az egyéb távérzékelte adatok felhasználása a levegőhőmérséklet eloszlásának modellezésére. Alapvetően Gallo és munkatársai foglalkoztak ezzel és eredményeik szerint vegetációs időszakban a léghőmérséklet és a vegetációs index (NDVI) között szorosabb kapcsolat áll fenn, mint a léghőmérséklet és a felszínhőmérséklet között

[Gallo – Owen, 1999]. Ilyen típusú vizsgálatok azért is előnyösek tudnak lenni, mivel az NDVI értékek meghatározásához a rövidebb hullámhosszú sugárzási értékekre van szükség, melyek jellemzően jóval nagyobb térbeli felbontást biztosítanak (az ASTER szenzor esetében a termikus infravörös spektrumban 90 m a felbontás, míg szintén ASTER adatok alkalmazásával 30 m felbontású NDVI térképek készíthetők).

A másik módszer, mely egyértelműen sokkal jobban alkalmazható biológiailag inaktív felületek összehasonlítására, az pedig a hőáramok számítása [Kato – Yamaguchi, 2007]. A vegetációs index elemzés alapja az, hogy a városok felmelegedése alapvetően a megnövekedett mesterséges felületek arányának köszönhető, vagyis minél alacsonyabb a vegetációs index, annál erősebbnek kell lennie a városi hőszigetnek (a levegő hőmérséklet emelkedésének). A hőáramok számítása során a levegő felmelegedésének folyamatát követjük végig, vagyis a beeső sugárzás először a felszíneket melegíti fel és a felszín melegíti fel azután a levegőt (ez okozza alapvetően a léghőmérséklet napi maximumának fáziskésését a felszínhőmérséklet napi maximumához képest). A hőáramok számolása általános esetben meglehetősen bonyolult, rendkívül sokminden befolyásolhatja [Valiente et al., 2010], azonban némely jellemző mesterséges (városi) felület esetében lehet tenni bizonyos jelentős egyszerűsítéseket a megfelelő feltételek megléte esetén. Az egyszerűsített egyenlete a hőáramnak a felszín és a levegő között (7.) [Valiente et al., 2010]:

$$H = (\rho_a C_p / r_{ah}) dT, \quad (7.)$$

ahol ρ_a a levegő sűrűsége, C_p a levegő fajhője normál légköri nyomáson, r_{ah} a hőszállítás aerodinamikus ellenállása (érdesség) és $dT = T_f - T_l$ a hőmérsékletkülönbség a felszín és a levegő között. Meg kell jegyeznünk, hogy a horizontális hőáramlásnál is rendkívül jelentős az érdesség, amely sajnos éppen városi esetben egészen extrém nagyságot is elérhet, így megkaphatjuk azt a jól ismert tényt, hogy egy belvárosi jellegű, 30 m magas zárt soros beépítés gyakorlatilag teljesen megszünteti az eltérő hőmérsékletű felszínnek által generált légmozgást is.

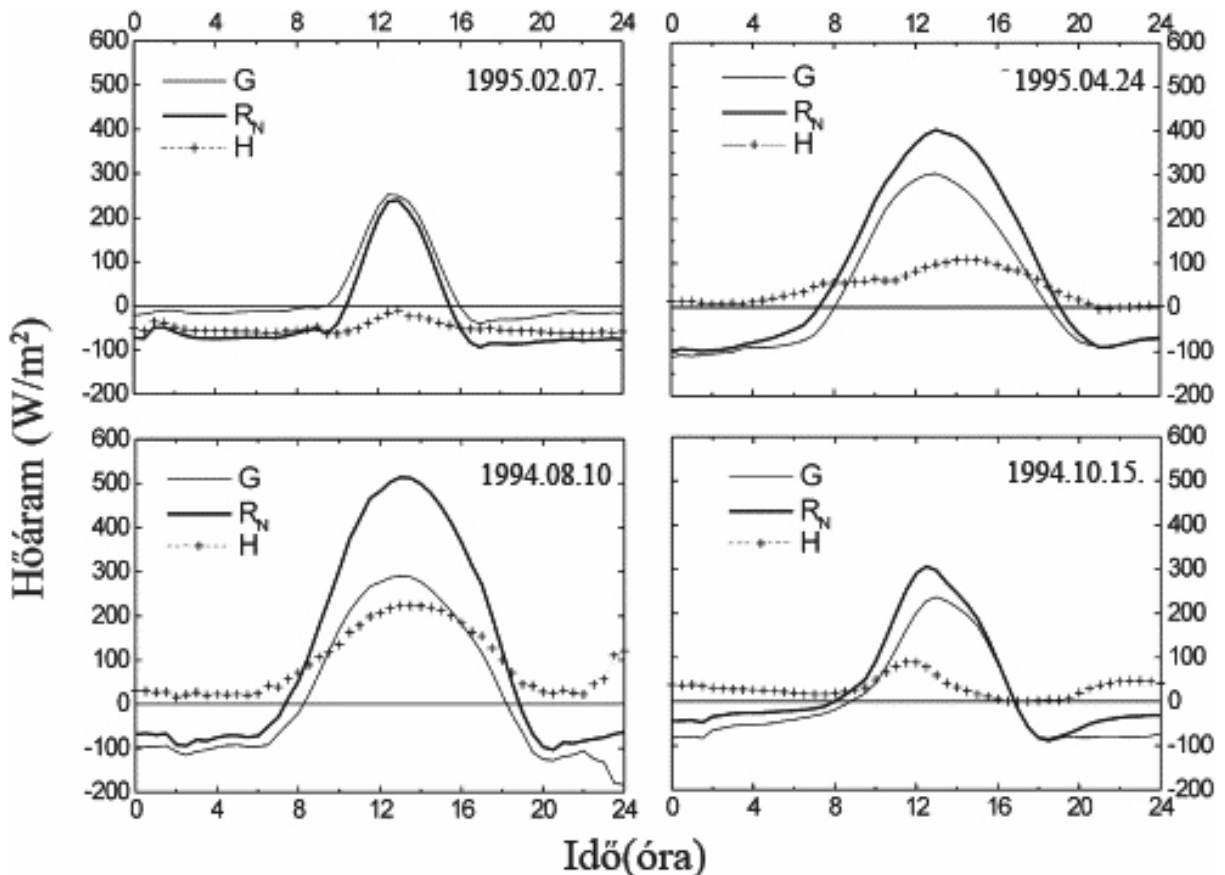
A hőátadást vizsgálva a felszín és a levegő között, speciális városi esetekben és felszíneknél érdemes további egyszerűsítéseket tenni. Először is csapadékmentes, szélcsendes, anticiklonális időjárási helyzetet feltételezve egyáltalán nem kell számolnunk sem a látens hővel, se pedig a légmozgás hűtő hatásával. Továbbá mesterséges felület esetén nem kell számolnunk evapotranspirációval, tehát sem a talajban levő víz párolgása, sem pedig növényzet párologtató hatása nem befolyásolja a hőáramot, vagyis a látens hő elhanyagolható. Ilyenkor rendkívül leegyszerűsödik a teljes sugárzási egyenleg (8.).

$$R_n - G = H$$

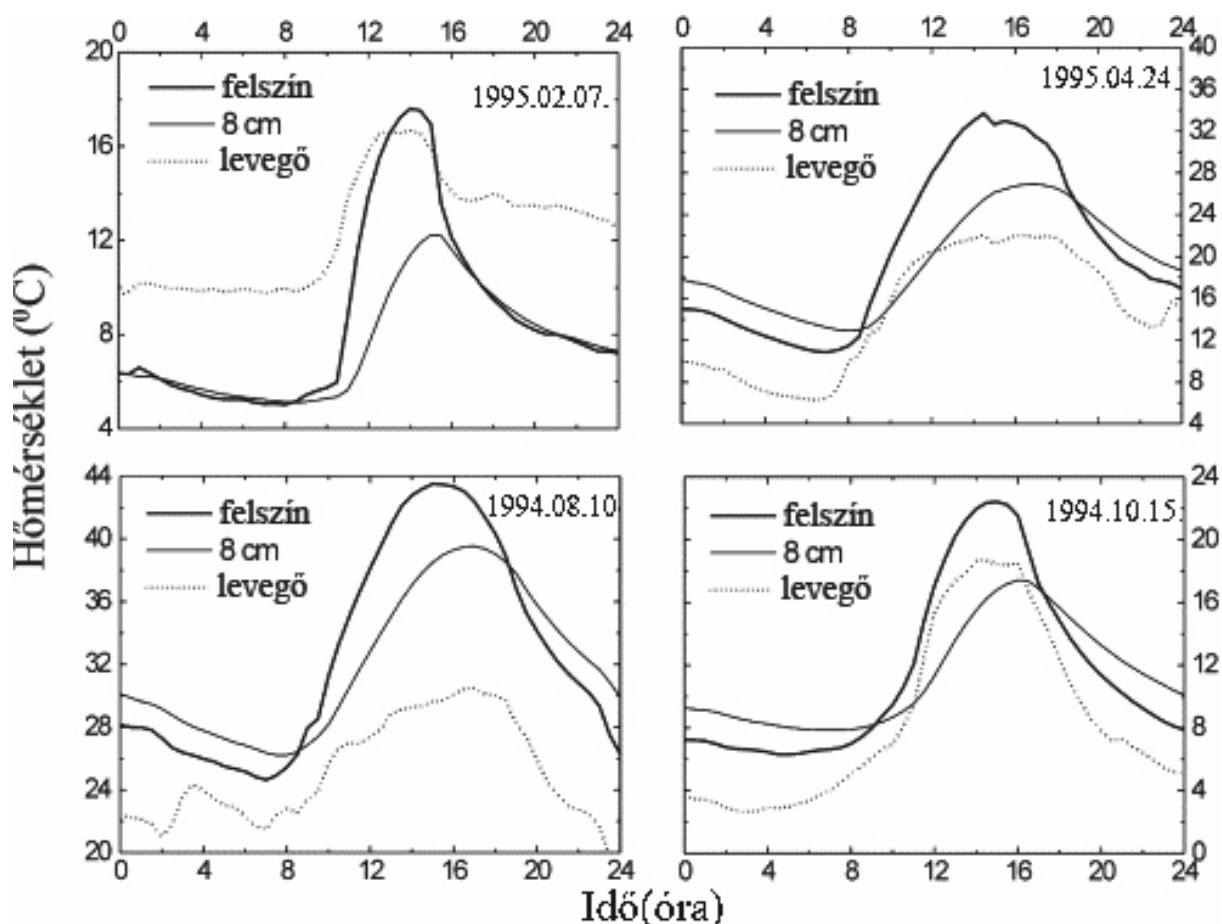
(8.)

ahol R_n a sugárzási egyenleg, G a talaj hőárama és H az érzékelhető hőáram.

A fenti mennyiségeket meglehetősen könnyű felszíni méréssel meghatározni, legalábbis a sugárzási egyenleget és a talaj hőáramát, így a fenti feltételek teljesülése esetén az egyszerűsített egyenletből (7.) az érzékelhető hőáram egyszerűen meghatározható. A továbbiakban röviden hivatkozok Anandakumar munkájára, aki kutatásában a fentieket mérte mind a négy évszakban egy teljes napon keresztül Bécsben egy aszfalt felszín esetében [Anandakumar 1999]. A hőáramok mérése mellett a levegőhőmérséklet, a felszínhőmérséklet közvetlen (nem távérzékel) mérése és az aszfaltfelszín alatt az anyagban 8 cm mélyen történő mérésre is sor került. A hőáramok eredményeit a 34. diagramon, a különböző mért hőmérsékletek napi menetét pedig a 35. diagramon tekinthetjük meg.



34.diagram *A hőáramok napi eloszlását láthatjuk a négy évszak egy-egy napján, mikor optimális (anticiklonális) időjárási viszonyok uralkodtak. R_n a sugárzási egyenleg, G a talaj hőárama és H az érzékelhető hőáram. Jól látható, hogy az eloszlásokat elsődlegesen a beeső sugárzás mértéke határozza meg [Anandakumar 1999].*



35. diagram Ugyanazon mérés során láthatjuk a napi hőmérsékletek menetét is. A felszín alatt 8 cm-rel történő mérés minden évszakban kiegyensúlyozottabb napi eloszlást mutat, mint a másik két hőmérséklet típus, ennek oka a 8 cm-es réteg hőszigetelése. A felszínhőmérséklet minden évszakban szélsőségesebben mozog, mint a léghőmérséklet, tavaszi és nyári időszakban akár 5-10 °C-al magasabb is lehet a maximuma, mint a léghőmérsékleté és megfigyelhető, hogy nyári időszakban a léghőmérséklet maximuma később alakul ki, mint a felszínhőmérsékleté [Anandakumar 1999].

A fenti mérési eredmények azért jelesek szempontunkból, mivel bár a városi felszínek rendkívül összetettek, azonban a jellemző mesterséges felszínek viszonylag kisszámúak (jellemző tetőfedő anyagok és jellemző burkolattípusok), így azokra elvégezve ilyen típusú méréseket, lehetséges meghatározni a távérzékelt felszínhőmérséklet és a léghőmérséklet kapcsolatát. Másik nagy előnye a fenti mérésnek, hogy a felszínhőmérséklet egész napos mérése lehetővé teszi, hogy következtetéseket vonhassunk le a felszínhőmérséklet maximális és minimális értékére, valamint átlagára. Mindez rendkívül előnyös az ASTER felvételek esetében, hiszen azok csupán a délelőtti órákról szolgálnak információval Budapest esetében.

V. Hasznosítás: a városi hősziget csökkentési lehetőségei

A vizsgálataim során elemeztem Budapest területhasználatának és felszínborítottságának a városi hőszigetre gyakorolt hatását. Az elemzés során bebizonyosodott, hogy a szabályozási tervekben szereplő területhasználatoknál sokkal jobban meghatározó a felszín hőháztartása és a kialakuló városi hősziget intenzitás szempontjából az adott terület felszínborítottsága, illetve a felületminősége.

Fontos megjegyeznünk, hogy a jelenlegi szabályozási tervek alapvetően a területhasználat lehetőségeit, nem pedig a tényleges területhasználatot korlátozzák, továbbá elsődlegesen beépítési módokat határoznak meg, nem pedig az adott területen végzendő tevékenységek mikéntjét, sem az adott beépítésre jellemző felületek minőségét. Szabályozási tervek esetében két olyan helyzet áll elő jelenleg, mely közvetlen befolyásoló tényezője lehet a területet jellemző városi hősziget intenzitásnak, az egyik a minimális zöldfelületi arány, a másik pedig az esetlegesen meghatározott anyagi minősége az egyes felületeknek. A minimális zöldfelületi arány a legtöbb esetben csupán nem beépített és nem burkolt területként jelenik meg, hogy azon milyen szerkezetű és minőségű zöldfelület található, az legtöbbször nem tárgya a szabályozásnak. A másik eset pedig csupán a kifejezetten szigorú Helyi Építési Szabályzatokban jelenik meg, oka elsősorban nem energetikai, klimatológiai, hanem esztétikai, értékvédelmi célú (jellemzően amikor meghatározott színű és minőségű tetőfedést, kell alkalmazni, annak oka az épített környezethez való illeszkedés és nem pedig az épületek hőháztartásának a javítása általában).

Fontos kiemelni, hogy a városi hősziget egyértelműen antropogén hatású és nagy korrelációt mutat vizsgálataink alapján az adott terület felszínborítottságának minőségével. Mindez azért igen jelentős, mert egyúttal azt is jelenti, hogy szintén antropogén eszközökkel a jelenség intenzitása és káros hatásainak mértéke is jelentősen csökkenthető. Azonban az ilyen beavatkozásokat több szinten is meg kell tenni a városban, annak érdekében, hogy eredményesen tudjuk redukálni ezen negatív hatásokat.

A beavatkozási területeknek három szintjét különítettem el, az első az építészeti szint, vagyis már az épületek tervezésénél is célszerű olyan megoldásokat alkalmazni, melyek csökkentik az épületek és környezetük közti hőátadást. Előnye egyrészt, hogy csökken a városi hősziget, másrészt csökken az épületek energiafogyasztása és ezáltal ökológiai lábnyoma is.

A következő szint a tájépítészeti, szabadtertervezési szint. Az épületek mellett a szabad terek minősége, melyeknek nagysága összemérhető (a legtöbb esetben pedig még mindig nagyobb) a beépített területek nagyságával, szintén rendkívül meghatározó, így azoknak

kialakítása nagyban hozzájárulhat a városi hősziget intenzitásának növeléséhez illetve csökkentéséhez, a kialakítástól függően. A szabadtervertervezés ilyen (városklimatológiai) szempontból egy szinten áll az építészeti tervezéssel.

A harmadik szint, mely az előző kettő fölé helyezhető, a településtervezés, illetve a települési szabályozás szintje. E szinten lehetőség van a korábban említett építészeti és szabadterépítészeti eszközök alkalmazásának előírására, illetve tiltására, továbbá mivel itt városmorfológiai, illetve területhasználati megkötések és előírások tételére is lehetőség van, itt lehet leginkább elérni, hogy klimatológiai szempontból optimális település jöjjön létre (új település, településrész esetében), illetve hogy optimális irányba fejlődjön a (már meglévő) település.

V.1. Építészeti módszerek, megoldások

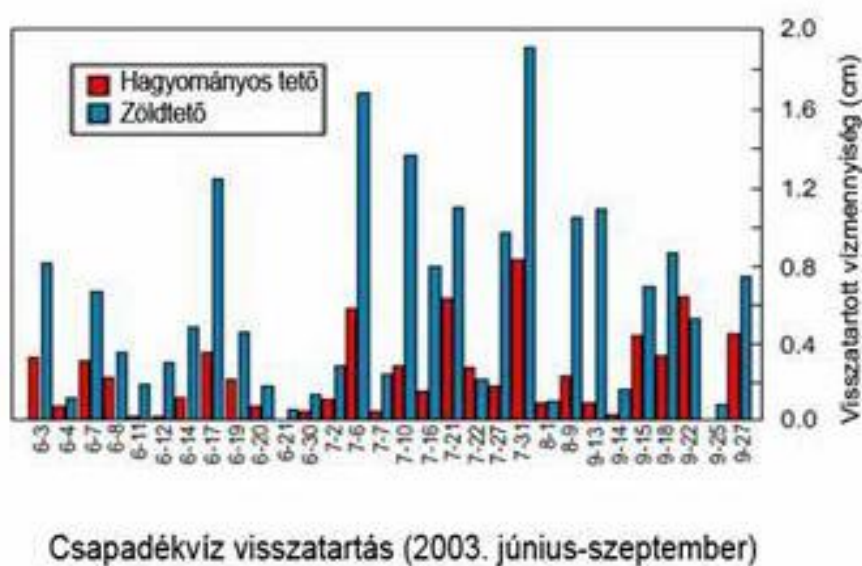
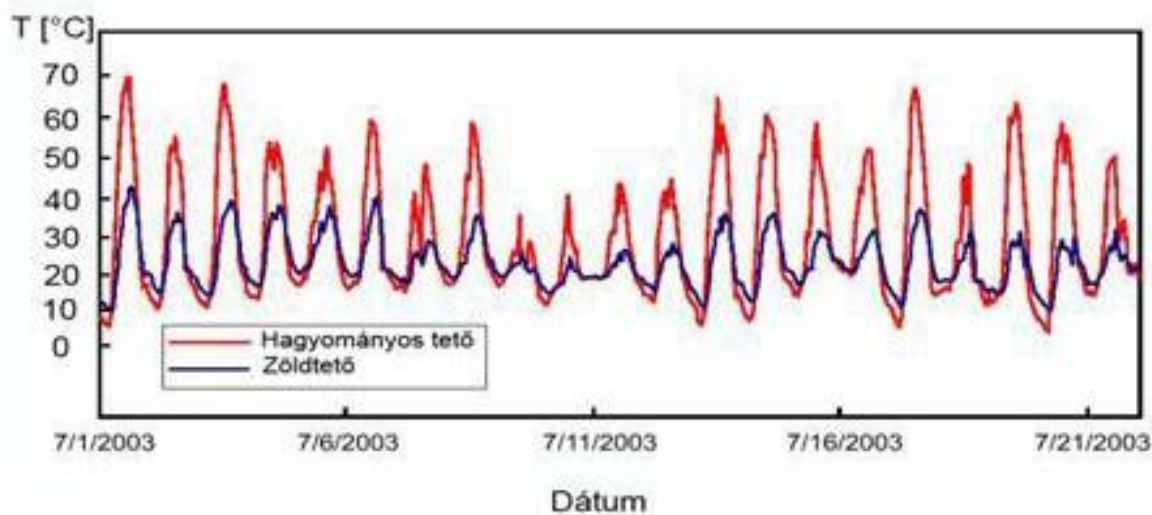
Az építészeti módszerek és megoldások azok, melyek a legegyszerűbből kidolgozhatóak, illetve épületek esetében a konkrét hőszennyezés, felmelegedési hajlandóság is közvetlenül mérhető, illetve számolható. Mindennek ellenére több probléma is akad az épületeink környezettudatosabbá, energiatakarékosabbá tételénél, illetve azok hőszennyezésének csökkentésénél (mely végső soron az egyik fő okozója a városi hőszigetnek).

Az egyik probléma, hogy az ökológikus szemléletű tervezés még nem terjedt el, köszönhetően jogszabályoknak, lobbierdekeknek és különböző építészeti trendeknek (melyek egymásra is hatással vannak). A másik probléma, hogy az ökológikusság és az energiatakarékosság olyan jelzőkké váltak, melyek alapvetően építészeti "termékek" eladásában segítenek, ugyanakkor mindemellett tényleges pozitív tulajdonságaik másodlagossá váltak és adott esetben csupán látszólag tűnnek pozitívnak (pl. intenzív zöldfalak [http://www.greenrooftechology.com/green_walls megnyitva 2012.03.25-én]).

Vizsgálataim alapján a következők állíthatóak. Már egyetlenegy nagy méretű épület is jelentős hatással bír a környezetében kialakuló városi hősziget intenzitására és térbeli eloszlásra. Jó példa erre a korábban elemzett Arena Plaza, a Papp László Budapest Sportaréna, valamint a Duna parton a Corvinus Egyetem központi épülete (az egykori Fővám Palota) és az I. számú Vásárcsarnok épületegyüttese. Fontos kiemelni, hogy ezen épületek jelentős negatív hatása a környezetükre nem a funkciójukból, illetve az azt szabályozó területhasználatból adódik, hanem ezen épületek kialakításából, energiagazdálkodásából és felületi (homlokzati, héjazati) anyagainak minőségéből. Pont az Arena Plaza esetében - mely kifejezetten negatív példa- adódik egy pozitívum is: az épülethez csatlakozó nagyméretű

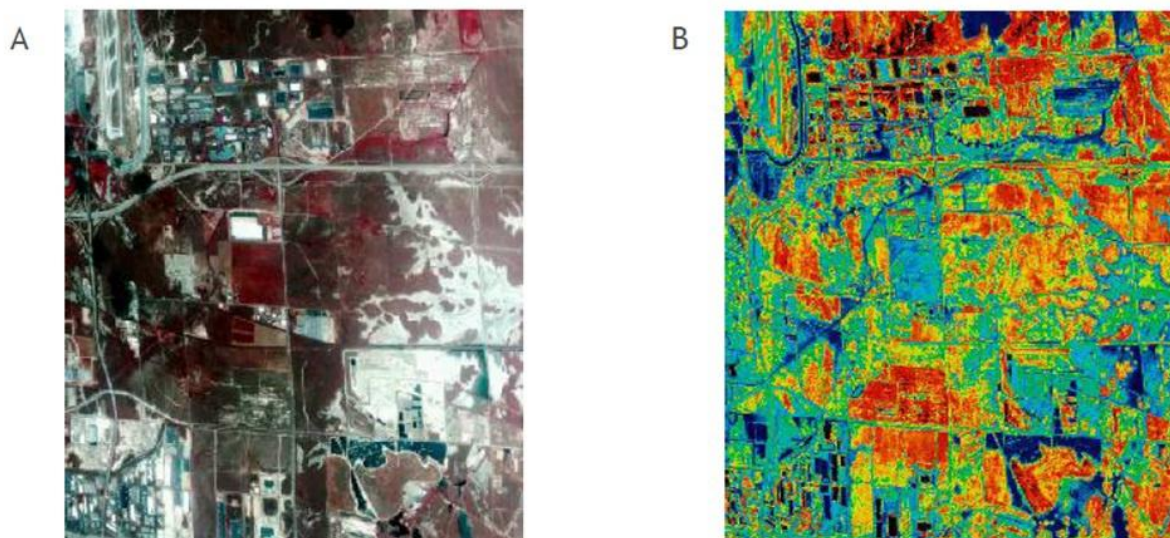
zöldtető, mely jelentősen hűvösebb, mint magának a bevásárlóközpontnak a főépülete, holott a kétfajta tető (zöldtető és hagyományos lapostető felülvilágítókkal) alatt egyformán épületrészek (klimatizált mélygarázs, illetve az üzletek) találhatóak.

Tehát mindezek alapján elmondhatjuk, hogy a zöldtetők alkalmazása ideális eszköz az egyes épületek esetében városi hősziget hatás csökkentésére. A zöldtetők kapcsán el kell mondani [Oláh, 2010e], hogy szerkezetük következtében több módon is képesek csökkenteni az adott épület felszínén a felmelegedést (30. kép). Egyrészt növényzet borítja őket, mely transzpirációval jelentős mennyiségű vizet elpárologtatva képes csökkenteni az épület nappali felmelegedését. Másik, ehhez kapcsolódó tény, hogy a zöldtető rétegredek, a talajkeverék és a felületszivárgó lemez jelentős mennyiségű csapadékvizet tart vissza, melyek így jelentősen növelik a tető hőkapacitását, vagyis így sokkal kevésbé melegszik fel napközben az épület (ugyanakkor pedig éjszaka kevésbé is hűl le). A harmadik jelentős tényező, hogy mind a talajréteg, mind pedig a felületszivárgó lemez jelentős térfogatú levegőt tartalmaz, mely köztudottan jó hőszigetelő, így a tető hőszigetelő képessége is jelentősen megnő. A megnövekedett hőkapacitás és a jelentősen jobb hőszigetelés mind télen, mind nyáron jelentősen javítja az épület hőháztartását, így ezen időszakokban egyaránt csökkenti az épület és környezete közötti hőátadást, míg a növényzet szerepe vegetációs időszakban jelentős, így olyankor jelentős további hűtő, hősziget csökkentő hatása van [Gerzson – Oláh, 2012].



30. Kép. A zöldtető előnye a hőháztartás és a csapadékvíz vissztartás szempontjából

Több, további módszer is ismeretes az építészetben, mellyel eredményesen csökkenthető a városi hősziget mértéke. Ezek közül mindenképp kiemelendő a tetők fényvisszaverő képessége növelésének (fehér tetők) programja [Jo et al., 2010]. Az eljárás alapelve, hogy jelentősen megnövelve az épület albedóját, az a beeső sugárzás jelentős részét visszaveri és így sokkal kevésbé melegszik fel (31. kép). Hatása sokkal kevésbé sokrétű, mint a zöldtetőké, azonban kétségkívül eredményes. Továbbá olyan területeken, ahol a zöldtetők alkalmazásának jelentős fenntarthatósági korlátai vannak (sivatagi, félsivatagi területek), ott célszerű ezt a megoldást alkalmazni.



31. kép Salt Lake City infravörös műholdképe. A fehér tetők és a hűvösebb területek korrelációja.

A passzívházak építése, továbbá minden olyan módszer, mely azt célozza, hogy az épületek hőkibocsátása csökkenjen, valamilyen mértékben mind a városi hősziget csökkenésének irányában hat, azonban ki kell emelni azt, hogy a napenergia hasznosítása egyes esetekben olyan módszerekkel történik [Oláh, 2010f], melyek sajnos pont a városi hősziget mértékének növelését eredményezik. Ilyen például a megnövelt üvegfelületek alkalmazása az épületek napos oldalán, illetve ugyanitt a sötét szín alkalmazása. Mindezekről elmondható, hogy az épület benti hőmérsékletének fokozott, szélsőséges ingadozásához vezetnek, ellentétben például a zöldtetővel, mely a hőingadozást csökkentő hatású, így pedig ezen téves megoldások az épület temperálásához szükséges energiafelhasználás növekedését is eredményezik a városi hősziget hatás növelése mellett.

Összességében azt lehet mondani, hogy a megfelelően kialakított épületek létrehozása, illetve meglévő épületek megfelelő módon történő átalakítása, és ennek tömeges megtörténte az egyik legjobb módszer a városi hősziget csökkentésére.

V.2. Tájépítészeti módszerek, megoldások

A szabad terek mind méretükben (jellemzően a város területének több, mint a fele), mind pedig a felületi jellemzőikben alapvetően meghatározzák a városi hősziget szerkezetét. Szabadtereken találhatóak vizsgálataink szerint azon felszínborítások és területhasználati módok, melyek leginkább képesek mérsékelni a városi hősziget intenzitását a környezetükben

(vízfelületek és zöldterületek), valamint azon területek is, melyek rendkívüli mértékben képesek felerősíteni a városi hőszigetet (utak, burkolatok, közlekedési területek).

A vizsgálataim alapján a vízfelületek azok, melyek leginkább képesek mérsékelni a városi hőszigetet a környezetükben. Hatásuk egyértelműen leírható, alapvetően három okra vezethető vissza: a víz rendkívül magas fajlagos hőkapacitására, a 100%-ban párologtató felületre, valamint az advekciós hőkiegyenlítődesre, vagyis a vízfelületnek nem csupán a felszíne melegszik fel, hanem a szilárd anyagokkal ellentétben lehetőség van a hőmérséklet-különbségek hőáramlással történő kiegyenlítésére (ez utóbbi nagyobb, mélyebb vizek esetében lényeges). Folyóvizek esetében ki kell még emelni az áramlás hatását, melynek következtében egyrészt intenzívebb a hűtő hatás, a párologás, másrészt pedig a településen kívülről folyamatosan friss, hűvös víz kerül a településre.

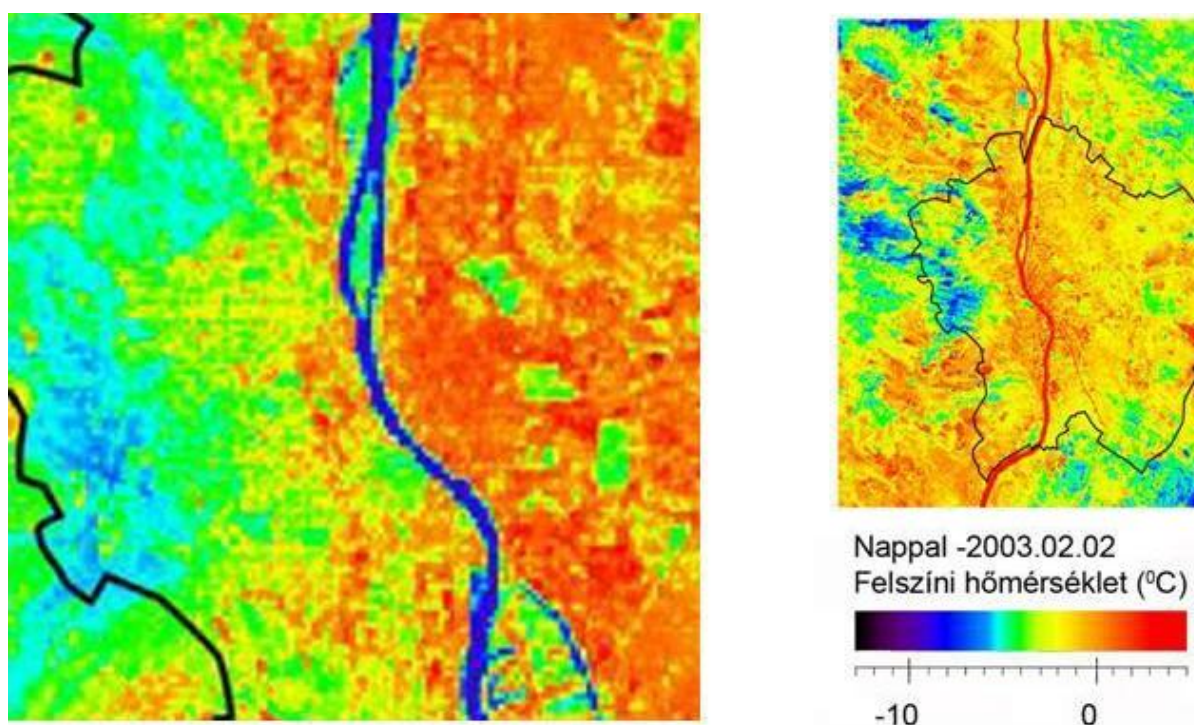
Fontos megemlíteni, hogy a vizsgálatok során azt lehetett megállapítani, hogy a legkisebb méretű vízfelület is jelentős hatással bír. Bár az ASTER termális infravörös felvételek felbontóképessége 90 m, ennek ellenére még olyan keskeny vízfelületek is, mint a Molnár-sziget melletti Soroksári Duna mellékág (mintegy 20 m széles) hatása is egyértelműen kimutatható, mintegy 5-8 °C-al hűvösebb a környezeténél. Hasonlóképpen kimutathatóak olyan kisméretű állóvizek hatásai, mint például az Orczy-kert kisméretű (mintegy 1 hektáros) tava, mely az általam vizsgált műholdképeken csupán egy pixelként jelenik meg, azonban a 2002-es és 2008-as késő tavaszi felvételeken mégis ez a kisméretű vízfelület bizonyult a VIII. kerület leghűvösebb pontjának.

A különböző Duna-ágak vizsgálatánál az is nyilvánvalóvá vált, hogy amennyiben növényzet borítja a vízfelületek partjait, úgy azok jelentős mértékben kiterjesztik ezt a hatását, illetve úgy is meg lehet fogalmazni, hogy az állandó vízellátás a növényzet transpirációját és ezúton hűtő hatását növeli meg jelentős mértékben.

A másik jelentős felszíntípus a növényzettel borított felszín, a zöldfelület. A hűtő hatás összetevői ezen esetben rendkívül sokrétűek, elsősorban a transpirációnak köszönhetőek, melynek önmagában is rendkívül sok összetevője van. Ilyenek a talajvíz szintje, a faállományt alkotó fajok, az állomány kora, egészségi állapota. Mindemellett rendkívül jelentősnek bizonyult még az állomány szerkezete. Mint az eredményekből kiderül, a zárt faállományok, melyek viszonylag magasak, képesek a legnagyobb hűtő hatást elérni. Eme jelenségnek is több oka van, az első, hogy a magasabb zárt faállományok természetesen idősebbek, így egyrészt nagyobb a fajlagos párologtató felületük, másrészt a gyökerzónájuk is jól fejlett, így mélyebbről is képesek felszívni a talajvizet, mely az transpiráció folyamatánál meghatározó jelentőségű. Ugyanakkor nagyon fontos megemlíteni a pusztán mechanikai árnyékoló hatást. Bár a műholdas felvételek erről természetesen nem adhatnak információt, hiszen azok a

felső lombkoronaszint hőmérsékletét tudják csak érzékelni, azonban egyszerű fizikai megfontolásokat tekintve nyilvánvaló, hogy minden növényi metabolizmustól eltekintve a puszta árnyékoló hatás, főleg amennyiben több rétegű ez az árnyékoló rendszer (többszintes növényállomány) rendkívül jelentős lehet, ahogy azt az építészeti árnyékoló szerkezetek alkalmazása is világosan mutatja.

A negatív példákra szabadtereken elsősorban a sötét színű, illetve az alacsony hőkapacitású (aszfalt, természetes kő és beton) burkolatok hozhatók példának. A Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtéri kifutópályák a legekleatásabb példák erre, különösen a téli időszakban (32. kép).



32. kép Budapest téli hőtésképe, a jobb szélén látható a legforróbb pont, a repülőtéri kifutópályák területén.

Amit rendkívül fontos még megemlíteni, az a különböző hősziget mérséklő hatások kiterjedése. A vizsgálataink alapján egyértelmű összefüggés van a felszínborítás és az adott felszínt jellemző hőmérséklet között. Átmenetek még a leghűvösebb és a legmelegebb területek között is csupán egy pixel (90 m) terjedelemben figyelhetőek meg, amennyiben pedig egyéb tényleges határolás is van a kétfajta terület között (pl. a Kerepesi temető zöldfelülete fallal van elválasztva a Józsefvárosi pályaudvar területétől), akkor egyértelmű az elkülönülés a hűvös és a forró terület között (15-18. Kép). A fentiek alapján elmondhatjuk, hogy egy adott terület, zöldfelület hőmérséklet mérséklő hatása annak határain kívül nem jelentős, hőcsere jellemzően csupán az eltérő hőmérsékletű felszínek által indukált légmozgás

következtében jöhet létre, azonban a zöldfelületet határoló területhasználat és beépítés rendkívül meghatározó ebben az esetben, hiszen például zárt soros beépítés esetében még az ilyen típusú hőcsere is teljes mértékben akadályozottá válik.

Szabadtértervezési szempontból, amennyiben a célunk az, hogy maximális hűtőhatást érjünk el a vegetációs időszakban (csökkentsük a hőszigetet), néhány olyan tervezési elvet kell figyelembe vennünk, mely eddig nem volt túl hangsúlyos a mindennapi tervezői gyakorlatban [Oláh, 2010d], azonban amelyeket a vizsgálataink eredményei mindenképpen indokolnak. Az első és a legfontosabb szempont, hogy a jelenlegi gyakorlattal ellentétben célszerű a zárt faállományok kialakítása az adott zöldfelület minél nagyobb részén, ezáltal maximalizálva a zöldfelület hűtő hatását. Ez esetben érzékelhető némi ellentmondás a jelenlegi tervezési gyakorlattal, főleg közparkok és nagyobb méretű városi zöldfelületek esetében. A közparkok esetében jellemző a nagyobb nyílt gyepfelületek kialakítása, melyet elsősorban a használattal magyaráznak. Ugyanakkor ennek a tervezési attitűdnek jelentős stílustörténeti gyökerei is van. Véleményem szerint célszerű a városi szabadtértervezés esetében a jelenleginél jobban elválasztani a rekreációs és a kondicionáló funkciót. Nyilvánvaló, hogy egy zárt ültetésrendű zöldfelület erősebb lehűlése abból is következik, hogy a határain kisebb a hőátadás a határoló városi területek felé, vagyis kisebb a hűtő hatása. Ezzel ellentétben egy nyitottabb lazább ültetésrend pedig valamivel erősebb hűtő hatást eredményezhet a szomszédos területek felé. Azonban figyelembe kell venni a felszínhőmérsékletre kapott eredményeket, vagyis, hogy a zöldfelületek jelentősen kisebb felszínhőmérséklete nem változtat érdemben a szomszédos felszínnek hőmérsékletén. A léghőmérsékletben érezhető hatás pedig rendkívüli mértékben befolyásolt a városi terület "érdességétől" mely pont a belvárosi helyzetekben tekinthető a legnagyobb, tehát például a zárt soros beépítés gyakorlatilag megszünteti a hőáramlással történő kondicionálás lehetőségét. Mindezek alapján a zárt soros beépítésű területeken az utcafásítás és a belső udvarok fásítása javasolható, mint leoptimalisabb kondicionálási lehetőség. A területi jellegű (nem vonalas) zöldfelületek esetében pedig célszerű felülvizsgálni a nagy nyílt felületek alkalmazásának kérdését (vagyishogy a napozáson kívül melyik rekreációs funkció igényli az ilyen típusú felületeket). Meglevő városszerkezet káros hősziget jelenségének és a humán komfort javításának szempontjából kiemelten fontos a közterek, a fásított közterek és az utcafásítások megfelelő kialakítása, a lombkorona borítottság minél nagyobb arányának elérése. Végezetül meg kell említeni a fenntarthatósági szempontokat, ezt két példával lehet leginkább illusztrálni, az első egy fásított köztér esete, ahol burkolatban álló fák találhatóak, a másik pedig egy nagyobb nyílt gyepfelület összevetése. Amennyiben a fák várostűrőek és tágtűrősek (pl. magyar kőris, kocsányos tölgy), továbbá lombkoronaszinten zártak, akkor

úgy a kondicionáló hatásuk is igen magas, valamint (amennyiben nem igényelnek öntözést), úgy teljesen fenntarthatónak is tekinthetőek. Ezzel ellentétben egy kielégítő állapotú gyepfelület fenntartási igénye Budapesten gyakorlatilag megegyezik egy terepszinten kialakított intenzív tetőkert fenntartási igényeivel (az öntözés anyag és energiaigénye, valamint a fenntartás munkaerőigénye miatt), miközben ahogy a Szilas-patak melletti gyepfelület példáján láthattuk, hőmérsékletre gyakorolt hatása, biológiai aktivitása, tanszpirációs képessége még jó vízellátás mellett is alacsonyabb, mint egy fás szárú növényállományé.

Tervezési és várostervezési szempontból, bár a közparkok, közkertek és egyéb közösségi használatú városi zöldfelületek esetében a rendkívül sok funkció egyszerre történő eredményes betöltése ezen zöldfelületek egyik vitathatatlan előnye, azonban mégis célszerű tervezésük, megújításuk elején deklarálni, hogy a környező városi területek kondicionálása, vagy pedig a rekreációs funkciója az elsődleges. Amennyiben ez utóbbi, akkor arra célszerű törekedni, hogy magának a zöldfelületnek a területén érzük el a maximális humánkomfortot, nem pedig arra, hogy a környező városi felületekre gyakoroljon a zöldfelület minél nagyobb (sok esetben azonban eleve meglehetősen kis hatótávolságú) hűtő hatást.

A másik rendkívül lényeges elem, hogy célszerű minden zöldfelületen (amennyiben lehetséges) vízfelületet is kialakítani. A harmadik, amit viszont szigorúan mikroklimatológiai értelemben kell venni, hogy célszerű a zöldfelületek körülkerítése. Ez hangsúlyozottan nem hagyományos értelemben vett kerítést jelent, hiszen bármi ilyen közterületen történő alkalmazásának rendkívül jelentős társadalmi visszhangja lenne, ezzel ellentétben állományklíma kialakítása, például különösen tágtűrűsű növényfajok telepítése a zöldfelület határain, mely védi a belső zöldfelületet, mindenképpen célszerű. A negyedik tervezési szempont, amennyiben a körülmények indokolják (pl. Budapest síkvidéki területein), a talajszint süllyesztése (amennyiben kivitelezhető használhatóság szempontjából). Ennek előnye egyrészt, hogy a talajvízszint közelebb kerül a felszínhez, amely ezáltal könnyebben és hamarabb felvehető, másrészt pedig a süllyesztett talajszint ad egyfajta természetes védelmet a növényállománynak, vagyis ez egy egyedi módja az állományklíma hatékony kialakításának (körbekerítésnek). Nagyon fontos továbbá a megfelelő növényfajok, fajták kiválasztása, itt alapvető szempont, hogy tágtűrűsű növényeket válasszunk, ugyanakkor azonban képesnek kell lenniük minél nagyobb mértékű párologtatásra, transpirációra. Eme esetben célszerű a kifejezetten a Pesti-medencében őshonos fafajok választása. Az eredeti társulások itt jobbára fűz-nyár ligeterdők, tölgy-kőris-szil ligeterdők, homoki tölgyesek, gyertyános tölgyesek. Fontos megjegyezni, hogy uralkodó fafajaik (tölgy, kőris, szil, fűz, nyár) néhány kivételtől eltekintve mindkét kritériumnak (tágtűrés, magas transpirációs képesség) eleget tesznek.

V.3 Településtervezési módszerek, megoldások Budapest példáján

A városi hősziget hatékony csökkentése alapvetően településrendezési eszközökkel történhet. Kétféle módja van mindennek, egyrészt a fent említett építészeti és szabadterépítészeti módszerek előnyben részesítése, vagy akár adott esetben előírása, a másik pedig a kifejezetten városrendezési feladatok esetében a klimatológiai szempontok figyelembe vétele.

Az országos szintű szabályozásban, vagyis az építési törvényben [Éptv., 1997] illetve a kapcsolódó rendeletben [OTÉK, 1997] is célszerű érvényre juttatni mindezen szempontokat, azonban ahol leginkább érvényt lehet ezeknek szerezni, az a Helyi Építési Szabályzat, illetve a kapcsolódó szabályozási tervek szintje.

A vizsgálataim eredményei alapján felmerül néhány kifejezetten településrendezésinek tekinthető eszköz, mellyel hatékonyan lehet mérsékelni a városi hőszigetet. Az egyik ilyen eredmény, hogy egy adott zöldfelület távhatása egyáltalán nem tekinthető jelentősnek. Mindennek következménye, hogy a nagy, koncentrált zöldfelületek nem tudják érdemben mérsékelni a városi hőszigetet már 1-2 háztömbnyi távolságban sem. Éppen ezért célszerű a városi zöldfelületi rendszertervek esetében is nagyobb, elkülönített zöldfelületek helyett a zöldhálózatokra helyezni a hangsúlyt a településtervezésben. Továbbá épp ezért, a jelenlegi gyakorlattal szemben, célszerű nagyobb figyelmet fordítani a lineáris elemekre (útfásítások, allék kialakítása), különös tekintettel arra, hogy a vizsgálati eredmények szerint a fás szárú növényzet esetében az árnyékoló hatás legalább olyan fontos, mint a transzspiráció a felszínhőmérséklet csökkentésében.

A másik településrendezési eszköz, melynek használatát egyéb városklímái kutatások [Unger, 2010, 53-62. o., 85-88. o.] is indokolják, az a városi felszín tagoltságával kapcsolatos. Az égboltláthatósági faktor (SVF), mely alapvetően a városi felszín tagoltságának egyfajta mérőszáma, és a városi hősziget összefüggéseire vonatkozó kutatások azt igazolták [Gál et al., 2009], ami fizikai megfontolások által alátámasztott sejtés is volt, hogy a városi hősziget annál intenzívebb, minél nagyobb a városi felszín tagoltsága, vagyis minél kevésbé látszik az égbolt az utca szintjéről. Mindezen eredmények összecsengenek saját vizsgálati eredményeimmel is, amikor zárt soros és szabadonálló beépítési módok összehasonlításáról volt szó (minden más tényező, úgymint forgalom, szintterületi mutató csaknem jelentéktelen elérése esetén) (19. kép).

Előnyös a minél nagyobb égbolt-láthatósági faktor elérése a beépített területen a városi hősziget minimalizálása szempontjából. Városépítészeti szempontból háromféleképpen lehet növelni az égbolt-láthatósági faktort. Az első a minél alacsonyabb épületek alkalmazása. Természetesen egyéb megfontolások (pl. városközponti helyzet stb.) nem teszik lehetővé,

hogy egy egész nagyváros földszintes legyen, azonban a napjaink világvárosait uraló kereskedelmi negyedek csoportos magasházassal beépítési módját célszerű lesz a jövőben Budapesten elkerülni. A másik módszer a zárt soros beépítés elhagyása és a többi beépítési mód előnyben részesítése. Mint láthattuk (19. kép), csaknem ugyanakkora szintterület mutatóval rendelkező szabadonálló beépítési mód sokkal kisebb felmelegedést eredményez, mint a zárt soros beépítés. A harmadik és leghatékonyabb módszer az épületek közötti szabad terek méretének növelése. Mindez, meglevő telek beépítési százalékokat feltételezve (ennek csökkenése gazdasági okokból nem várható) elsősorban a közterületek és azon belül is elsősorban az utcaszélességek növelését jelenti. Utcaszélesség növelése elsősorban újonnan beépítésre kijelölt területek esetében lehetséges.

Van egy módszer, amely mind gazdasági, mind pedig klimatológiai, ökológiai szempontból előnyös lehet. Itt arról van szó, hogy az utca szabályozási szélességét nem növelik, azonban kötelezően előírják az előkert létesítését (építési vonal kijelölésével) és az előkertben pedig a Helyi Építési Szabályzat beültetési kötelezettségét (idős nagyméretű lombos fa beültetése) ír elő, ahogy azt már a jelenlegi jogszabályok is lehetővé teszik. Már az 1940-es években felmerült ez a gondolat [Ormos, 1943], melynek előnyei a következők: egyrészt nincs szükség rendkívül széles utcák kiszabályozására, melynek fenntartási kötelezettségei jelentős terheket rónának a közösségre. Ugyanakkor pedig feltételezve két fasort a közterületen, valamint az előkertekben a faültetési kötelezettséget, egy közönséges utca helyett egy négy fasorral rendelkező sétányt kapunk, mely a megfelelő fafajok telepítése és előírása esetén rendkívül jelentős klimatológiai és hősziget mérséklési szempontból is. Gazdasági szempontból az ilyen megoldás nagy előnye, hogy a két "külső fasor" fenntartási kötelezettségei a telektulajdonosokat terhelik. Mindez teljes összhangban van a zöldhálózat fejlesztés alapelveivel is.

A minél nagyobb mértékű fásítás nem csupán a szabadtertervezésben, hanem a településtervezésben is követendő alapelv, még akkor is, ha más módon is megvalósítható. Ebből a szempontból érdemes megfontolást tárgyalni, hogy jelenleg csupán budapesti zöldövezeti kategóriaként létező fásított köztér (Z-FK) magasabb szintű szabályozókba (pl. OTÉK) történő bevezetését.

Összességében általános követelménynek kell lennie, hogy a városi zöldfelületi rendszernek a többi városi részrendszerrel (közlekedési és közmű hálózatok) egyenrangúnak kell lennie, és azon belül is a jelenleginél sokkal jelentősebb szerepet kell kapniuk a fásításoknak, valamint az utcafásításoknak. A vizsgálataink alapján a minél magasabb lombkorona-borítottság kialakítása az elérendő cél, mind szabadter-, mind pedig településtervezési szinten.

VI. Összegzés

Összefoglalva a fontosabb eredményeimet és következtetéseimet, a a vizsgálataim alapján megállapítottam:

1. A városi hősziget teljes egészében ugyan nem vizsgálható az általunk elemzett ASTER termális infravörös műholdfelvételek elemzésével, hiszen sem a hősziget függőleges térbeli szerkezete, sem annak napi változásai, sem pedig a különböző makroklimatikus helyzetektől való függése nem elemezhető velük, azonban a különböző területhasználati és beépítési módok, valamint a városi felszíneknek a városi hőszigettel való összefüggése és kölcsönhatása elemezhető és vizsgálható ezzel a módszerrel.
2. A különböző területhasználati, szabályozási térképek valamint a légifotók, Google Earth felvételek és helyszíni bejárások alaján elmondható, hogy a városi hősziget területhasználatától és beépítéstől való függése nem magyarázható a jelenlegi területhasználati tervekkel (melyek alapvetően csupán területhasználati és beépítési lehetőségeket, valamint korlátokat rögzítenek), azonban a légi- és a Google Earth felvételek segítségével a különböző felszíni minőségek, különböző szerkezetű növényállományok hőmérsékleti hatásai egyértelműen beazonosíthatóak.
3. A vizsgálataim alapján egyértelműen állítható, hogy már egyetlenegy nagyméretű épület is jelentős hatással bírhat a városi hősziget szerkezetére (Aréna Plaza, Papp László Budapest Sportaréna, I. számú Vásárcsarnok), továbbá ezen épületek esetében nem a területhasználati besorolása, hanem a felületi (homlokzati, tető) anyagi, hőtechnikai jellemzői, valamint a méretük a meghatározóak. Vagyis alapvetően nagyméretű, több hektáros, temperált belső hőmérsékletű épületekről van szó, melyeknek rendkívül rossz hőtechnikai tulajdonságú tetőfedésük van. Jellemzően ezen héjazati anyagok az üveg, illetve a fém tetőfedések, melyeknek rendkívül rossz a hőszigetelő képességük, valamint kicsi a fajlagos hőkapacitásuk, így temperált belső tér esetén a környezetükre is rendkívül jelentős hőterhelést rónak.
4. Az ugyanolyan méretű, temperáltságú és használati intenzitású épületek esetében a felszín minőségétől függően akár 12 °C (!) felszínhőmérséklet-különbség is kialakulhat. Az Arena Pláza és hozzá kapcsolódó hasonló méretű mélygarázs vizsgálata mutatott rá a felszínborítás és azon belül is a biológiailag aktív felszín/tető ezen jelentős hatására. Az időjárási helyzet (de ez esetben elmondható hogy az időjárási viszonyok bármilyen skálán) teljesen megegyező volt a mélygarázs és a pláza

esetében. A környezetet tekintve, a felszínborítással nem számolva, még azt is lehetett várni, hogy a mélygarázs felszíne lesz a melegebb, mivel az közelebb esik a Kerepesi úthoz és a Keleti Pályaudvar vágányaihoz, míg a Pláza épülete pedig közvetlenül a Kerepesi Temető zöldfelülete mellett helyezkedik el. Mivel egy temperált mélygarázsról van szó, így az épületrészek eltérő belső hőmérsékletével sem magyarázható az eltérés, különösen nem a későbbi májusi esetben (abban az időszakban az épületgépészeti eszközök hőkibocsátása minimális). Az egyetlen lényeges eltérés szempontunkból a zöldtető és a felülvilágítókkal ellátott hagyományos lapostető a két épületrész között.

5. A különböző beépítési módok lényegesen befolyásolják a az egyes városrészek felszínhőmérsékletét. A Bajza utca két oldalán vizsgálva a zárt soros és a szabadonálló típusú beépítéseket, a zárt soros beépítésű terület felszínhőmérséklete 3-4 °C-al bizonyult melegebbnek, mint a szabadonálló beépítéssel jellemzett terület felszínhőmérséklete. Fontos megjegyezni, hogy a Bajza utca és a Városliget közti terület használati intenzitása egyáltalán nem kisebb, mint a Bajza utca és a Nagykörút közötti területé (átmenő forgalom szempontjából talán még nagyobb is), hiszen az itt található egyedülálló épületek a telekterület igen nagy %-át elfoglalják és ugyanolyan épületmagassággal/szintszámmal rendelkeznek. Tehát a tapasztalt hatás egyértelműen az eltérő beépítési mód és annak velejárói (jelentősen nagyobb égbolt láthatósági index, nagyobb mértékű fásítottság) következményének tekinthetőek.
6. A leghűvösebb városi felületnek a vízfelületek bizonyultak, ezek közül is kiemelkedő Budapesten a Duna szelvénye. A téli hőfelvétel alapján ugyanakkor elmondható, hogy a vízfelületek a legmelegebb felületek közé tartoznak télen (csupán a pontszerű anomáliák, vagyis az említett nagyméretű épületek és a repülőtéri kifutópályák nagy kiterjedésű, csapadékmentesített burkolata voltak melegebbek), és ezen fűtő hatás egyedi speciális mikroklimát biztosít a Duna szigeteken, melyeknek így elsődlegesen közösségi szabadterei használata indokolt. A vízfelületek méretének és a hűtő hatás mértékének összefüggéseinél több dolgot is állíthatunk. Először is az alkalmazott műholdfelvételek alapján nem található egy olyan minimális méretű vízfelület, amelynél kisebb esetén nem kimutatható a hőmérséklet-mérséklő hatás. A 90 m-es térbeli felbontású műholdképek a csupán 20 m széles vízfelület esetén is (mely ugyan parti növényzettel kísért) már jelentős mértékű (5-8 °C-os) hűtő hatást mutattak ki. A Duna esetében ezen hatás akár több mint 10 °C-os is lehet (!). Tehát a fentiek alapján állíthatjuk, hogy már egészen kis méretű vízfelületek is jelentősen képesek csökkenteni nyári időszakban a környezetük hőmérsékletét, így minél szélesebb körű

alkalmazásuk indokolt városi környezetben klimatológiai szempontból. Továbbá természetes vízfelületek (tavak, folyók, patakok) kísérő zöldfelületei sokkal jelentősebb hűtő hatást mutatnak, mint a többi zöldfelület, így a természetes vízfelületeket kísérő növényzet megőrzése, illetve újbóli kialakítása a kívánatos a városi hősziget mérséklése szempontjából.

7. A növényállomány vizsgálata alapján a következőt lehet állítani: a vízfelületek után a növények képesek leghatékonyabban csökkenteni a városi hősziget mértékét a területükön. A hűtő hatás összetevői növényállomány esetében sokkal bonyolultabbak, mint vízfelület esetében. Elmondható, hogy minél magasabb a növényzet biológiai aktivitása, annál nagyobb hűtő hatással bír a környezetére. Továbbá a vizsgálati eredményeim alapján állítható, hogy a zárt lombkoronasztű, fás szárú növényállományok bizonyultak a leghűvösebbnek. A különböző vizsgált állományok alapján állítható, hogy hősziget mérséklés szempontjából a jó várostűrő, nagy transzpirációs képességű, idősebb, magas záródott faállományok a legalkalmasabbak, melyek gyökérzónája már elérte a talajvíz szintjét. Következésképp a városi zöldfelületek kialakításánál a hősziget mérséklése szempontjából a minél nagyobb arányú lombkorona-borítottság elérése volna a kívánatos, az optimális arány kialakításánál természetesen figyelembe véve a többi használati szempontot is.
8. A külső környezeti hatásoktól védett növényállományok nagyobb hőmérséklet mérséklő hatás kifejtésére képesek. Mindez különösen tapasztalható a Kerepesi Temető déli határánál, ahol a legmarkánsabb hőmérsékleti ugrás volt megfigyelhető pontosan a Kerepesi temető határoló falának vonalában. A rendkívül markáns hőmérsékleti ugrás köszönhető annak, hogy az itt található kerítés egy tömör, magas fal, valamint itt található a legzártabb növényállomány az egész temetőben. A kettő együtt eredményezi a markáns hűtő hatás kialakulását közvetlenül már a terület szélén.

Az eredmények és a módszertan a jövőben tovább fejleszthető egyrészt nagyobb felbontású távérzékelte adatok (repülőgépes, vagy műholdas termális infravörös képek) alkalmazásával, továbbá mobil felszíni mérőállomások alkalmazásával, melyek a jellegzetes felszíntípusok felett mérnek standard meteorológiai hőmérsékletet, szélsőséget, valamint felszínhőmérsékletet is. Ezáltal a távérzékelte adatokból kapott eredményeket ki lehet terjeszteni egyrészt a napszakos változások modellezésére, másrészt a léghőmérséklet és a felszínhőmérséklet közti kapcsolat összefüggéseire.

A fenti eredmények alapján bizonyossá vált, hogy a városi a felszínhőmérsékletek hatékonyan mérséklehetőek építészeti, szabadtér-építészeti és várostervezési módszerek

alkalmazásával. Egy ilyen típusú mérséklés következménye szükségszerűen a városi hőszigetnek a csökkenése (térben, időben, intenzitásban és gyakoriságban egyaránt). A következőekben ezen három szintű javaslati rendszert vázolom fel:

- i. A városi hősziget hatékonyan mérsékelhető a megfelelő építészeti eszközök alkalmazásával. Ezek elsősorban olyan eszközök és megoldások, melyek egyúttal az egyes épületek energiafelhasználásának hatékonyságát is növelik. Elsősorban homlokzati és tetőfedési módokra kell gondolni, melyek jelentősen megnövelik az épület felszínének hőszigetelő képességét, továbbá jelentősen meg tudják növelni az épület teljes hőkapacitását, illetve még járható út az épületen kialakított párologtató felszínnek elhelyezése, valamint az épületek albedójának növelése. A zöldtetők alkalmazása az épület felszíni hőszigetelésének jelentős javulását, a teljes épület hőkapacitásának jelentős növekedését, valamint nyári időszakban párologtató felszín jelenlétét eredményezi az épület sugárzásnak (fűtő hatásnak) leginkább kitett részén. A fehér tetők alkalmazása az épület fényvisszaverő képességének jelentős javulását, ezáltal pedig sokkal kisebb mértékben történő felmelegedését eredményezi a kritikus, nyári időszakokban.
- ii. A vizsgálataink eredményei alapján állíthatjuk, hogy a városi hőszigetet leginkább mérsékelni képes felülettípusok a vízfelületek és a zöldfelületek, melyek túlnyomó részt (leszámítva a zöldtetőket) a szabad tereken találhatóak, továbbá a városok nagyobb része, több, mint 50 %-a jellemzően szabadtér, tehát a megfelelő szabadtértervezési eszközök, módszerek, tervezési elvek alkalmazásával a városi hősziget mértéke, intenzitása jelentősen csökkenthető. Mivel a zárt lombkoronaszintű növényállományok, melyekben kialakul az állományklíma, a leghatékonyabbak hűtés szempontjából, továbbá a vizsgálataink szerint az ilyen hűvös felszínnek távhatása nem igazán jelentős, ezért az ilyen zárt, magas lombkorona-borítottsággal, valamint vízfelülettel rendelkező, tágtűrésű, magas evapotranspirációra képes fajokból álló zöldfelületek kialakítása a célszerű. Továbbá zöldfelületek esetében rendkívül fontos a lezárt, önálló városi tömböt alkotó zöldfelületek helyett a városi zöldhálózatok kialakítására helyezni a hangsúlyt, tehát a jelenleginél jóval nagyobb hangsúlyt kell kapniuk a lineáris városi zöldfelületek (utca- és útfásítások) kialakításának és fenntarthatóságának.
- iii. A városi hősziget mérséklésének elsődleges eszköze az ilyen szempontok integrálása a településtervezési eszközökbe és jogszabályokba, elsődlegesen a Helyi Építési Szabályzatokba. Ezen integráció feladata kettős, egyrészt a fent említett építészeti és szabadtérépítészeti eszközöknek és módszereknek kell helyt adni, azok alkalmazása

számára kell kedvező jogszabályi környezetet biztosítani, másrészt pedig a hősziget intenzitásának növekedését eredményező megoldások alkalmazását kell visszaszorítani jogszabályi eszközökkel. A másik feladat a kifejezetten várostervezési kérdésekben a klimatológiai szempontok érvényesítése. Jelenti ez egyrészt a beépítési módok közül a szabadonálló, odalhatáron álló és ikres beépítési módok előnyben részesítését a zárt soros beépítéssel szemben. Másrészt a minél szélesebb utcák kialakítását, melyek egyrészt az égbolt láthatósági faktor növekedését eredményezik, mely a városklíma kutatások szerint a városi hősziget intenzitásának csökkenésével jár együtt, másrészt pedig lehetőség van az utca, mint lineáris elem hatékony fásítására, vagyis többes fasorok kialakítására akár teljes egészében közterületen, akár részben magánterületen is, amely megoldás összhangban van a szabadtér építészeti eszközök esetében megfogalmazottakkal és így a zöldfelületi rendszer klimatológiai szempontból hatékony kialakítását eredményezi. Cél, hogy a zöldfelületi rendszer a többi városi részrendszerrel (közlekedési rendszer, közműrendszerek) egyenrangú legyen. Továbbá a város teljes területét tekintve cél a minél nagyobb lombkorona-borítottság elérése, mely a leghatékonyabb módszer a városi hősziget hatás mértékének csökkentésére.

VII. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozom a témavezetőmnek, Mezősné Dr. Szilágyi Kingának a támogatásért. Továbbá külön köszönöm barátaimnak, Szabó Gyöngyvérnek és Csepely-Knorr Lucának akiknek segítségével ezen mű sosem készülhetett volna el.

TÁMOP-4.2.1.B-09/1/KMR-2010-0005

10.1 Kutatóműhely



Nemzeti Fejlesztési Ügynökség

www.ujszachenyiterv.gov.hu

06 40 638 638



A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

A doktori disszertáció a **TÁMOP 4.2.1.B-09/1/KMR-2010-0005 Program** támogatásával készült.

VIII. FELHASZNÁLT IRODALOM

- Abu-Lughod, 1987 Abu-Lughod, Janet L. (1987): The Islamic city – Historic Myth, Islamic Essence, and Contemporary Relevance. *International Journal of Middle East Studies* (1987), 19 : pp 155-176
Copyright © Cambridge University Press 1987
- Anandakumar, 1999 Anandakumar, K. (1999): A study on the partition of net radiation into heat fluxes on a dry asphalt surface, *Atmospheric Environment*, Volume 33, Issues 24–25, October 1999, Pages 3911-3918
- Aqua, 2002 Aqua (2002): *Science writers' guide to Aqua*. NASA Goddard Space Flight Center, Earth Observing System Project Science Office, Greenbelt, 40p.
- Arena, 2007 Plaza Centers executes agreement for sale of Arena Plaza in Budapest (A Plaza Center megegyezett a budapesti Arena Plaza eladásáról) *Europe Real Estate* (2007. augusztus 9.)
- Ashley – Orenstein, 2005 Ashley, D. – Orenstein, DM. (2005): *Sociological theory: Classical statements (6th ed.)*. Boston, Massachusetts, USA: Pearson Education. pp. 3–5, 32–36.
- ASTER, 2001 ASTER (2001): *ASTER Higher-Level Product User Guide*, Version 2.0, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 80p.
- Bartholy et al., 2009 Bartholy, J., Pongrácz R., Lelovics E., Dezső, Zs. (2009): Comparison of Urban Heat Island Effect Using Ground-based and Satellite Measurements. *Acta Climatologica et Chorologica*. Universitatis Szegediensis, Tomus 42-43, 2009, 7-15. o.
- Ben-Dor – Saaroni, 1997 Ben-Dor, E. – Saaroni, H. (1997): Airborne video thermal radiometry as a tool for monitoring microscale structures of the urban heat island. *International Journal of Remote Sensing*, London, 18(14), pp. 3039-3053.
- Bletter, 1987 Bletter, Rosemarie Haag (1987): The Invention of the Skyscraper: Notes on Its Diverse Histories. *Assemblage* No. 2 (Feb., 1987), p 110-117
<http://www.jstor.org/stable/3171092>

- Bocz, 1992 Bocz Ernő szerk. (1992): *Szántóföldi növénytermesztés*. Mezőgazda Kiadó. Budapest.
- Blumenfeld, 1949 Blumenfeld, Hans (1949): Theory of City Form, Past and Present. *Journal of the Society of Architectural Historians* Vol. 8, No. 3/4 (Jul. - Dec., 1949), p 7-16
Article Stable URL:<http://www.jstor.org/stable/987432>
- Brada et al., 1997 Industrial Economics of the Transition: Determinants of Enterprise Efficiency in Czechoslovakia and Hungary. *Oxford Economic Papers*, Vol. 49, Issue 1, p 104-127
- Bruse – Fleeer, 1998 Bruse, Michael – Fleeer, Herbert (1998): Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software*, Vol. 13, Issues 3–4, p 373–384
- Bullock, 1987 Bullock, N. (1987): Plans for post-war housing in the UK: The case for mixed development and the flat. *Planning Perspectives* Vol. 2, Issue 1, 1987 p 71-98
- Burns, 1976 Burns, Alfred (1976): Hippodamus and the Planned City *Historia: Zeitschrift für Alte Geschichte* Bd. 25, H. 4 (4th Qtr., 1976), p 414-428
URL:<http://www.jstor.org/stable/4435519>
- Burrows, 1999 Burrows, Edwing G. – Wallace, Mike – Wallace, Mike L. (1999): *Gotham: a history of New York City to 1898*, Oxford University Press, 1999. p 1383
- Burton, 1912 Burton, Clarence M. *Early Detroit: A sketch of some of the interesting affairs of the olden time*. Burton Abstracts. [OCLC 926958](#)(1912)
- Capuzzo, 1998 Capuzzo, Paolo (1998): The defeat of planning: the transport system and urban pattern in Vienna (1865-1914). *Planning perspectives*, Vol. 13. Issue 1. 23-51. o.
- Carlson et al., 1977 Carlson, T. N., Augustine, J. A., Boland, F. E. (1977): Potential application of satellite temperature measurements in the analysis of land use over urban areas. *Bulletin American Meteorological Society*, 58, pp. 1301-1303.

- Chudnovsky et al., 2004 Chudnovsky, A., Ben-Dor, E., Saaroni H. (2004): Diurnal thermal behavior of selected urban objects using remote sensing measurements. *Energy and buildings*. Volume 36, Issue 11, November 2004, pp. 1063-1074
- Conrady – Kingslake, 1992 Conrady, A. E. – Kingslake, Rudolf (1992): *Applied optics and optical design*, Courier Dover Publications, 1992. 544p. p 465
- Cook, 1996 Cook, Jeffrey (1996): *Seeking structure from nature: The organic architecture of Hungary*. Birkhauser (Basel and Boston)
- Csepely-Knorr, 2010a Csepely-Knorr, Luca (2010): *Frederick Law Olmsted's Public Parks, Parkways and their influence on the Continent*. In: Fabos, Julius Gy – Ryan, Robert L. - Lindhult, Mark – Kumble, Peter - Kollányi, László – Ahern, Jack – Jombach, Sándor (ed.): *Proceedings of Fábos Conference on Landscape and Greenway Planning* 2010. p 671-678.
- Csepely-Knorr, 2010b Csepely-Knorr, L. (2010): Public Parks in Budapest at the turn of the 19th Century. In: *Lippay- Ormos- Vas Conference full paper book*.
- Csepely-Knorr et al., 2010 Csepely-Knorr L. – Gergely A. – Olah A. B. (2010): The Use of Archive City Plans in Contemporary Urban Planning. *Paper presented at ISUF, 17th Conf. Int. Seminar on Urban Form*. Hamburg, Germany, 20-24. August 2010.
- Csepely-Knorr, 2011 Csepely-Knorr, Luca (2011): *Korai Modern Szabadtérépítészet. A Közparktervezés-elmélet fejlődése az 1930-as évek végéig*. Doktori Értekezés. Budapesti Corvinus Egyetem, 2011.
- Dalley, 1993 Dalley, Stephanie (1993): *Ancient Mesopotamian Gardens and the Identification of the Hanging Gardens of Babylon Resolved*. *Garden History* Vol. 21, No. 1 (Summer, 1993), p 1-13
<http://www.jstor.org/stable/1587050>
- Dear, 2003 Dear, Michael (2003): *The Los Angeles School of Urbanism: An Intellectual History*. *Urban Geography*, Vol. 4. Number 6. 2003 p 493-509
- Dezső, 2009 Dezső, Zs. (2009): *A Magyarországi és Közép-Európai Nagyvárosokban Kialakuló Városi Hősziget Vizsgálata Finom Felbontású Műholdképek Alapján*. – Thesis for PhD doctor's degree.

- Dick – Rimmer, 1998 Dick H. W. – Rimmer P. J. (1998): Beyond the Third World City: The New Urban Geography of South-east Asia. *Urban Stud* 1998 Vol. 35 no. 12 2303-2321
- Dickerson et al., 1997 Dickerson, R. R. – Kondragunta, S. – Stenchikov, G. – Civerolo, K. L. – Doddridge, B. G. – Holben B. N. (1997): The Impact of Aerosols on Solar Ultraviolet Radiation and Photochemical Smog. *Science* 1997: Vol. 278 no. 5339 p 827-830
- Dobi et al., 2009 Dobi, Ildikó – Mika János – Olah, András Béla – Lelovics, Enikő – Dezső Zsuzsanna – Pongrácz, Rita – Bartholy, Judit (2009): Cold and hot events in urban environment. In: *ICUC-7, Int. Conf. on Urban Climate*, Yokohama, Japan, 2009. June 29-July 3.
http://www.ide.titech.ac.jp/~icuc7/extended_abstracts/index-web.html
- Dousset – Gourmelon, 2003 Dousset, B. – Gourmelon, F. (2003): Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and landcover. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 58, pp. 43-54.
- Dunnett et al., 2008 Dunnett, Nigel – Nagase, Ayako – Booth, Rosemary – Grime, Philip (2008): Influence of vegetation composition on runoff in two simulated green roof experiments. *Urban Ecosystems*, Vol. 11, Number 4, p 385-398
- Éptv., 1997 1997. évi LXXVIII. Törvény az épített környezet alakításáról és védelméről
- Feierabend, 2004 Feierabend, Peter (2004): *Islam Kunst und Architektur*. Tandem Verlag GmbH, ISBN 3-8331-1036-8
- Finlayson – Pitts, 1986 Finlayson, B. J. – Pitts, J. N. (1986) : *Atmospheric chemistry: Fundamentals and experimental techniques*. John Wiley and Sons Inc., New York, NY 1520P
- Fishman, 1982 Fishman, Robert (1982): *Urban Utopias in the Twentieth Century: Ebenezer Howard, Frank Lloyd Wright, and Le Corbusier*. MIT Press, 332 p
- Foster et al., 1998 Foster, Stephen S. D. – Lawrence, Adrian – Morris, Brian (1998): *Groundwater in urban development: assessing management needs and formulating policy strategies*. World Bank Publications, 1998. 55 p

- Fuchs – Tanner, 1966 Fuchs, M. – Tanner, C. B. (1966): Infrared Thermometry of Vegetation. *Agronomy Journal*, Vol. 58 No. 6, p. 597-601 1966
- Gabor – Jombach, 2009 Gabor, Péter – Jombach, Sándor (2009): The Relation between the Biological Activity and the Land Surface Temperature in Budapest. *Applied Ecology and Environmental Research*, Vol. 7(3), 2009, Budapest
- Gallo et al., 1993a Gallo, K. P., McNab, A. L., Karl, T. R., Brown, J. F., Hood, J. J., Tarpley, J. D. (1993a): The Use of NOAA AVHRR Data for Assesment of the Urban Heat Island Effect. *Journal of Applied Meteorology*, 32, pp. 899-908.
- Gallo et al., 1993b Gallo, K. P., McNab, A. L., Karl, T. R., Brown, J. F., Hood, J. J., Tarpley, J. D. (1993b): The use of a vegetation index for assesment of the urban heat island effect. *International Journal of Remote Sensing*, London, 14(11), pp. 2223-2230.
- Gallo – Owen, 1999 Gallo, K. P., Owen, T. W. (1999): Satellite-Based Adjustments for the Urban Heat Island Temperature Bias, *Journal of Applied Meteorology*, 38, pp. 806-813.
- Gál et al., 2009 Gál, T. – Lindberg, F. – Unger, J. (2009): Computing continuous sky view factor using 3D urban raster and vector databases: comparison and application to urban climate. *Theor Appl Climatol* 95, 111-123
- Gerzson – Oláh, 2012 Gerzson, L., Oláh, A. b. (2012): A zöld építészet tájépítészeti vonatkozásai, eszközkörszere *4D Tájépítészeti és Kertművészeti folyóirat* Különszám, 245-257 o.
- Gillespie et al., 1999 Gillespie, A.R. – Rokugawa, S. – Hook, S.J. – Matsunaga, T. – Kahle, A.B. (1999): *Temperature/Emissivity Separation Algorihm Theoretical Basis Document, Version 2.4*. Department of Geological Sciences, University of Washington, Seattle, 64p
- Goricsán et al., 2011 Goricsán, István – Balczó, Márton – Balogh, Miklós – Czader, Károly – Rákai Anikó – Tonkó Csilla (2011): Simulation of flow in an idealised city using various CFD codes. *International Journal of Environment and Pollution*. Vol. 44, Number 1-4/2011 p 359-367. ISSN 0957-4352 (Print) 1741-5101 (Online)

- Gowers, 1995 Gowers, Emily (1995): The Anatomy of Rome from Capitol to Cloaca. *The Journal of Roman Studies* Vol. 85, (1995), p 23-32
Article Stable URL:<http://www.jstor.org/stable/301055>
- Greiffenberg, 2003 Kati Greiffenberg (2004): *Von Berlin nach Germania*. GRIN Verlag, 2004.
- Hall, 1955 Hall, John Whitney (1955): The Castle Town and Japan's Modern Urbanization *The Journal of Asian Studies* November 1955, 15, p 37-56
- Hall, 1997 Hall, Peter (1997): Megacities, World Cities and Global Cities. *Megacities Foundation*, Issue: February, p 1-24
- Harrington, 1997 Harrington, Winston (1997): Fuel Economy and Motor Vehicle Emissions. *Journal of Environmental Economics and Management* Vol. 33, Issue 3, p 240–252
- Hidy et al., 2011 Hidy, I., Gerzson, L., Prekuta, J.: *A ZÖLDTETŐ a városi tetőtáj koronája*. TERC Kft., 2011.
- Hirschfeld, 1785 Hirschfeld, Christian Caius Lorenz: *Theorie der Gartenkunst*. Band V. Leipzig, 1785.
- Hopkins, 2007 Hopkins, John N. N. (2007): The Cloaca Maxima and the Monumental Manipulation of Water in Archaic Rome. *The Waters of Rome*, Number 4, March 2007.
- Hoppit, 2011 Hoppit, Julian (2011): The Nation, the State and the First Industrial Revolution. *Journal of British Studies*, 2011. Issue: April, p 307-331
- Howard, 1833 Howard, L. (1833): *The climate of London deduced from meteorological observations made in the metropolis and at a various places around it*. 3rd edition, Harvey & Darton, London
- Howard, 1902 Howard, Ebenezer (1902): *Garden Cities of To-Morrow*. London, S. Sonnenschein & Co., Ltd. 1902.

- IPCC-SREX, 2012 **IPCC**, 2012: Summary for Policymakers. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 1-19.
- Jambor, 1993 Jám bor Imre (1993): *A település zöldfelülete*. KTM, Budapest.
- Jencks, 1973 Jencks, Charles (1973): *Le Corbusier and the tragic view of architecture*. Harvard University Press (Cambridge, Mass) ISBN 0674518608
- Jenkins, 1993 Jenkins, David (1993): *Unité d'habitation, Marseilles: Le Corbusier*. Phaidon Press, 1993 - 57 p
- Jereb, 1979 Jereb, Ottó (1979): Erdőműveléstan I. *Agrárszakoktatási Intézet*, Budapest.
- Jin et al., 2005 Jin, M., Dickinson, R. E., Zhang, D. L. (2005): The Footprint of Urban Areas on Global Climate as Characterized by MODIS. *Journal of Climate* 18, pp. 1551-1565.
- Jo et al., 2010 Jo, J. H. – Carlson, J. – Golden, J. S. – Bryan, H. (2010): Sustainable urban energy: Development of a mesoscale assessment model for solar reflective roof technologies. *Energy Policy*, Vol. 38, Issue 12, December 2010, Pages 7951–7959 *Special Section: Carbon Reduction at Community Scale*
- Jones et al., 1965 Jones, P. J. – Phil, D. – Hist. S., F. R. (1965): Communes and Despots: The City State in Late-Medieval Italy. *Transactions of the Royal Historical Society (Fifth Series)*(1965), 15 : p 71-96
- Kato – Yamaguchi, 2007 Soushi Kato, S., Yamaguchi, Y. (2007): Estimation of storage heat flux in an urban area using ASTER data, *Remote Sensing of Environment*, Volume 110, Issue 1, 14 September 2007, p 1-17
- Kemp, 1976 Kemp, Barry J. (1976): The Window of Appearance at El-Amarna, and the Basic Structure of This City. *The Journal of Egyptian Archaeology* Vol. 62, (1976), p 81-99
URL:<http://www.jstor.org/stable/3856347>

- Kitao, 1974 Kitao, Timothy K. (1974) *Circle and oval in the Square of Saint Peter's: Bernini's art of planning*. Published by New York University Press for the College Art Association of America (New York)
- Koepnick, 2001 Koepnick, Lutz (2001): Redeeming History? Foster's Dome and the Political Aesthetic of the Berlin Republic. *German Studies Review*, Vol. 24, No. 2 (May, 2001), p. 303-323
Article Stable URL: <http://www.jstor.org/stable/1433478>
- Kovács, 2007 Kovács, András Donát (2007): Regional Problems of Scattered Farms in the Homokhátság Area in Hungary. *Regionality and/or Localty*. Pécs: Centre for Regional Studies, Discussion Papers, Special. 2007. p 187-193
- KSH, 2007 Társadalmi, gazdasági jellemzők (Budapest), Központi Statisztikai Hivatal, 2007.
- KSH, 2010 Népeség, népmozgalom, Központi Statisztikai Hivatal, 2010. Budapest.
- KSH, 2011 Népeség a település jogállása szerint. Központi Statisztikai Hivatal, 2011. Budapest.
- KSH, 2011a Népmozgalom, 2010. *Statisztikai tükrő*, V. Évf. 17. szám. 2011.
- KSH, 2012 KSH 2012 Környezeti Helyzetkép, 2011. Központi Statisztikai Hivatal, 2012. Budapest. ISSN: 1418 087
- Landry, 2008 Landry, Charles (2008): *The creative city: a toolkit for urban innovators*. Earthscan, 2008
- Landsberg, 1981 Landsberg, Helmut Erich (1981): *The Urban Climate*. Academic Press, 1981. 275 p
- Leh – Chan, 1973 Leh, F. – Chan K. M. (1973): Sulfur compounds. Pollution, health effects, and biological function. *Journal of Chemical Education*, 1973, 50 (4), p 246
- Lynch, 2006 Lynch, Peter (2006). *Weather Prediction by Numerical Process. The Emergence of Numerical Weather Prediction*. Cambridge University Press. pp. 1–27. ISBN 978-0-521-85729-1.
- Lynch, 2008 Lynch, Peter (2008): The origins of computer weather prediction and climate modeling. *Journal of Computational Physics* (University of Miami) 227 (7): 3431–44.

- Major et al., 2002 Major, György – Nagy Zoltán – Tóth Zoltán (2002): Magyarországi Éghajlat-energetikai Tanulmányok. *Budapesti Közgazdaságtudományi és Államigazgatási Egyetem Környezettudományi Intézetének tanulmányai*. 9. szám. Budapest 2002. ISBN 963 503 273 0, ISSN 1587-6586
- Mega, 2010 Mega, Voula (2010): *Sustainable Cities at the Dawn of the Millennium: The Odyssey of Urban Excellence*. Springer, 2010.10.02. – 233 p
- Meyer – Turner, 1992 Meyer, William B. – Turner, B. L. (1992): Human Population Growth and Global Land-Use/Cover Change. *Annual Review of Ecology and Sytematics*, Vol. 23.
<http://www.jstor.org/stable/2097281>
- Mika, 1999 Mika, János (1999): A városi hősziget-hatás és a globális klímaváltozás kapcsolatáról. – *I. Városklimatológiai munkaértekezlet, Éghajlati és Agrometeorológiai Tanulmányok* 6, OMSz, 69-80
- Mumford, 1992 Mumford, Eric (1992): CIAM urbanism after the Athens charter Planning Perspectives Vol. 7, Issue 4, 1992. p 391-417
- NASA, 1999 NASA (1999): *Science writers' guide to Terra*. NASA Earth Observing System Project Science Office, Greenbelt, MD
- Neufert et al., 2012 Neufert, Ernst – Neufert, Peter – Baiche, Boushama – Walliman, Nicholas (2012): *Architects' Data*. John Wiley & Sons, 2012. 608p.
- Nichol, 1996 Nichol, J. E. (1996): High-resolution surface temperature patterns related to urban morphology in a tropical city: a satellite-based study. *Journal of Applied Meteorology*, Boston, MA, 35(1), pp.135-146.
- Oke, 1973 Oke, TR (1973): *City size and the urban heat island*. Atmos Environ 7, 769-779
- Oke, 1982 Oke, TR (1982): The energetic basis of the urban heat island. *Q J Roy Meteorol Soc* 108, 1-24
- Oke, 1987 Oke, TR (1987): *Boundary layer climates*. 2nd edition. Routledge, London-New York.

- Oláh, 2010a Oláh, A. B. (2010): The correlation between the urban heat island and the different land use types – *In: Fábos International Conference on Landscape and Greenway Planning 2010*, Budapest, Hungary.
- Oláh, 2010b Oláh, A. B., (2010): Detected effect of a newly constructed huge building on the heat balance of its surroundings – *In: 9th International Conference on Application of Natural-, Technological and-, Economical Sciences*, Szombathely, Hungary.
- Oláh, 2010c Oláh, A. B. (2010): The effects of different vegetation types on the local climate – *In: International Conference in Landscape Ecology*, Brno, Czech Republic.
- Oláh, 2010d Oláh, A. B. (2010): The Cold Garden Concept – *In: Non-human in Anthropology International Conference*, Prague, Czech Republic.
- Oláh, 2010e Oláh, A. B. (2010): Bioklimatikus városrehabilitáció és városi hőszigetek elkerülése. *Épített örökség és korszerű energiahatékonyság építési kultúra és CO₂-kibocsátás Építész szakmai konferencia*, 2010. április 15.
- Oláh, 2010f Oláh, A. B. (2010): The Green Building and Sustainability: Sustainable Construction of Ecological Green Living Buildings. *The International Journal of the Constructed Environment*, **Volume 1**, **Issue 1**, pp.39-50. Article: Print (Spiral Bound). Article: Electronic (PDF File; 1.285MB). <http://ijv.cgpublisher.com/product/pub.201/prod.15>
- Oláh, 2010g Oláh A. B. (2010): Innovation beyond the traditional urban transport solution. The advantages of the moving pavement. Scandinavian Urban Transport 2010 Conference. Stockholm, Svédország, Nov. 30- Dec. 1. 2010.
- Oláh, 2011a Oláh, A. B. (2011): Zéró szén-dioxid kibocsátású közösségi közlekedés. *Közlekedésbiztonság*, 2011/4, p 74-80
- Oláh, 2011b Oláh, A. B. (2011): The sustainable city. *5th Conference of the International Forum on Urbanism (IFoU)*. National University of Singapore, Szingapúr, Feb. 24-26. 2011.

- Oláh, 2011c Oláh, A. B. (2011): The ideal building material is transparent, light, is a good heat isolator, just like...
5th Conference of the International Forum on Urbanism (IFoU). National University of Singapore, Szingapúr, Feb. 24-26. 2011.
- Oláh, 2011d Oláh, A. B. (2011): Radically decreasing energy consumption of buildings by using the potential attribute of the gravity field.
5th Conference of the International Forum on Urbanism (IFoU). National University of Singapore, Szingapúr, Feb. 24-26. 2011.
- Oláh, 2011e Oláh A. B. (2011): A mozgójárda kínálta lehetőségek,
Közlekedésbiztonság 71-75. old., 2011/2, ISSN 2062-6916
- Olmsted et al., 1983 Olmsted, Frederick Law – Beveridge E. – Schuyler, David (1983): *Creating Central Park, 1857-1861*. Johns Hopkins University Press, 1983 - 470 oldal
- Olmsted, 1997 Olmsted, Frederick Law: The concept of the "Park Way".
Report of Landscape Architects and Superintendents. In:
Beveridge, Charles E. – Hoffmann, Carolyn F. (ed.): *The Papers of Frederick Law Olmsted. Vol I. Writings on Public Parks, Parkways, and Park Systems*. Baltimore - London, 1997. 112-146
- Ormos, 1943 Ormos, Imre (1943): A kertművészet szerepe a városépítészetben. *Magyar Epitőművészet*, 1943. február, 13-17. p 14.
- OTÉK, 1997 253/1997. (XII. 20.) Korm. rendelet
az országos településrendezési és építési követelményekről
- Park, 1987 Park, H-S (1987): Variations in the urban heat island intensity affected by geographical environments. *Environmental Research Center Papers 11*, The University of Tsukuba, Ibaraki, Japan, 79 p
- Péczely, 1979 Péczely, György (1979): *Éghajlattan*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest
- Phillips, 1956 Phillips, Norman A. (1956): The general circulation of the atmosphere: a numerical experiment. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 82 (352): 123–154.
- Probáld, 1974 Probáld, Ferenc (1974): *Budapest városklímája (The Urban Climate of Budapest)*, Akadémiai Kiadó, Budapest. 127 p

- Price, 1979 Price, J. C. (1979): Assessment of the heat island effect through the use of satellite data. *Monthly Weather Review*, 107, pp. 1554-1557.
- Rao, 1972 Rao, P. K. (1972): Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite. *Bulletin American Meteorological Society*, 53, pp. 647-648.
- Richelson, 1990 Richelson, Jeffrey T. (1990) : America's Secret Eyes in Space: The U.S. Keyhole Spy Satellite Program. *Harper & Row*. p 231
- Robinson, 2001 Robinson, Peter J. (2001): On the Definition of a Heat Wave. *Journal of Applied Meteorology*, 40, 762–775.
- Rogers, 1982 Rogers, Andrei (1982): Sources of Urban Population Growth and Urbanization. *Economic Development and Cultural Change*. Vol. 30. No. 3. p 483-506
<http://www.jstor.org/stable/3203204>
- Rolt, 1910 Rolt, L. T. C. (1910): *George and Robert Stephenson: The railway revolution*. Longmans (London)
- Roth et al., 1989 Roth, M., Oke, T. R., Emery, W. J. (1989): Satellite-derived urban heat island from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. *International Journal of Remote Sensing, London*, 10(11), pp. 1699-1720.
- Saalman, 1971 Saalman, Howard (1971): *Haussmann: Paris transformed*. G. Braziller, New York. ISBN 0807605832
- Schmidt, 2003 Schmidt G., 2003.: *Plants in garden design*. Mezőgazda, Budapest.
- Schreiner, 2007 Schreiner, Sarah (2007): *Urban Landscape Monographs-Hamburg*. GRIN Verlag, 2007
- Scott, 1904 Scott, S. P. (1904): *History of the Moorish Empire in Europe*. Philadelphia and London.: J. B. Lippincott Company. p. 3 vols.
- Serényi, 1967 Serényi, Péter (1967): Le Corbusier, Fourier, and the Monastery of Ema. *The Art Bulletin* Vol. 49, No. 4 (Dec., 1967), p 277-286
<http://www.jstor.org/stable/3048487>
- Shlomo et al., 2005 Shlomo, Angel – Seppard, Stephen C. – Civco, Daniel L. (2005): The Dynamics of Global Urban Expansion. *Report Transport and Urban Development Department*, The World Bank, Washington 2005.

- Szász – Tőkei, 1997 Szász, Gábor – Tőkei, László (1997): *Meteorológia mezőgazdáknak, kertészeknek, erdészeknek*. Mezőgazda Kiadó, Budapest, 1997.
- Székely, 2001 Székely, L. (2001): *Orthophotos BUDAPEST*. Székely és Társa Kiadó, Pécs.
- Szilágyi, 2009 Szilágyi, Kinga (2009): Zöldfelületi rendszer a városfejlesztés és várostervezés kontextusában. *Tanulmányok és esszék a 90 éves Mőcsényi Mihály tiszteletére Magyar Tudományos Akadémia Dísztermében rendezett tájépítészeti konferencia kötete*, Budapest, 2009. 217-227 o.
- Taggard, 1994 Taggard, Ralph E. (1994): *Weather satellite handbook (5th edition)*. Newington, [ISBN 0-87259-448-3](https://doi.org/10.1002/9780470448333).
- Taylor, 1998 Taylor, Marilyn (1998): Combating the Social Exclusion of Housing Estates. *Housing Studies*, Vol. 13, Issue 6, 1998. p 819-832
- Tiao et al., 1975 Tiao, G.C. Box, G.E.P. Hamming, W.J. (1975): Analysis of Los Angeles photochemical smog data: a statistical overview. *Journal of the Air Pollution Control Association (United States)*; Vol: 25:3, p 260-268
- Turnbull, 1987 Turnbull, Gerard (1987): Canals, coal and regional growth during the industrial revolution *The Economic History Review* Vol. 40, Issue 4, pages 537–560, November 1987
- Unger et al., 2009 Unger, János – Gál, Tamás – Rakonczai, János – Mucsi, László – Szatmári, János – Tobak, Zsolt – van Leeuwen, Boudewijn – Fiala, Károly (2009): Air Temperature versus Surface Temperature in Urban Environment. *The seventh International Conference on Urban Climate* 29 June - 3 July 2009, Yokohama, Japan
- Unger, 2010 Unger, J. (2010): *A Városi Hősziget Jelenség Néhány Aspektusa (Some Aspects of the Urban Heat Island Phenomenon)*. – Thesis for the MTA doctor's degree.

- Vandentorren et al., 2004 Stéphanie Vandentorren, Stéphanie – Suzan, Florence – Medina, Sylvia – Pascal, Mathilde – Maulpoix, Adeline – Cohen, Jean-Claude – Martine Ledrans (2004): Mortality in 13 French Cities During the August 2003 Heat Wave. *American Journal of Public Health*: September 2004, Vol. 94, No. 9, p 1518-1520.
- Vukovich, 1983 Vukovich, F. M. (1983): An analysis of the ground temperature and reflectivity pattern about St. Louis, Missouri, using HCMM satellite data. *Journal of Applied Meteorology*, 22, pp. 560-571.
- Whaples, 1990 Whaples, Robert (1990): Winning the Eight-Hour Day, 1909–1919. *The Journal of Economic History* (1990), p 393-406
<http://www.jstor.org/stable/1325325>
- Whitehead – Scanlon, 2007 Whitehead, Christine – Scanlon, Kathleen (2007): *Social Housing in Europe*. Published by LSE London, London School of Economics and Political Science ISBN 978-0-85328-100-9
- Xian, 2008 Xian, G. (2008): Satellite remotely-sensed land surface parameters and their climatic effects for three metropolitan regions. *Advances in Space Research*, 41, pp. 1861-1869.
- Yueguang, 2005 Yueguang, Zong (2005): Periodicity Scenarios in Metropolitan Region: A Case of the Baltimore-Washington Region in the USA. *Acta Geographica Sinica*, Issue: 3.
- Zaitzevsky, 1982 Zaitzevsky, Cynthia (1982): *Frederick Law Olmsted and the Boston park system*. Belknap Press (Cambridge, Mass.) 1982, ISBN 0674318307

IX. Képek, diagramok jegyzéke

1. kép.

http://news.bbcimg.co.uk/media/images/58746000/jpg/_58746023_c0015749-abbasid_bagdad_artwork-spl.jpg

2. kép.

<http://courses.umass.edu/latour/Italy/2005/Michelle/vaticanoverview.jpg>

3. kép. Bundesarchiv Bild 146III-373, Modell der Neugestaltung Berlins ("Germania").jpg

4. kép. http://www.isp.uni-luebeck.de/ifl04/img/luebeck_aerial.jpg

5. kép.

http://www.emeraldnecklace.org/static/filelib/ENC_Eng_reprint_FINAL_091610_page_2.pdf

6. kép. <http://modis-land.gsfc.nasa.gov/temp.html>

7. kép. http://www.vzlu.cz/images/cfd_pro_stavebnictvi.jpg

8-9. Kép.

https://lpdaac.usgs.gov/products/aster_products_table/on_demand/surface_kinetic_temperature/v1/ast_08

10. Kép. 46/1998. (X. 15.) Fővárosi Közgyűlési rendelet a Fővárosi Szabályozási Keretterről

11. Kép. <http://maps.google.hu/>

12-13. Kép.

https://lpdaac.usgs.gov/products/aster_products_table/on_demand/surface_kinetic_temperature/v1/ast_08

14. Kép. 46/1998. (X. 15.) Fővárosi Közgyűlési rendelet a Fővárosi Szabályozási Keretterről

15-22.kép

https://lpdaac.usgs.gov/products/aster_products_table/on_demand/surface_kinetic_temperature/v1/ast_08

23-24. Kép. <http://maps.google.hu/>

25. Kép. <http://maps.google.hu/>

27. Kép. <http://maps.google.hu/>

28.kép.

https://lpdaac.usgs.gov/products/aster_products_table/on_demand/surface_radiance_vnir_swir/v1/ast_09

29. Kép. <http://maps.google.hu/>

30. Kép. Bioklimatikus városrehabilitáció és városi hőszigetek elkerülése előadás. Épített örökség és korszerű energiahatékonyság építési kultúra és CO₂ kibocsátás. Építész szakmai konferencia 2010 április 15.

Budapest

31. Kép. NASA SLC Urban Heat Island Effect Roof.jpg

32. kép

https://lpdaac.usgs.gov/products/aster_products_table/on_demand/surface_kinetic_temperature/v1/ast_08

1. diagram. Oke, TR (1987): *Boundary layer climates*. 2nd edition. Routledge, London-New York.

2. diagram. Oke TR, 1979: Review of urban climatology 1973-1976. *WMO Tech. Note No. 169*

3. diagram. Park H-S, 1987: Variations in the urban heat island intensity affected by geographical environments. *Environmental Research Center Papers 11*, The University of Tsukuba, Ibaraki, Japan, 79 p

4. diagram. Oke, TR (1987): *Boundary layer climates*. 2nd edition. Routledge, London-New York.

5. diagram. Dobi, I., Mika J., Olah, A. B., Lelovics E., Dezso, Zs., Pongracz, R. and Bartholy, J., 2009: *Cold and hot events in urban environment*. In: ICUC-7, Int. Conf. on Urban Climate, Yokohama, Japan, 2009. June 29- July 3.
http://www.ide.titech.ac.jp/~icuc7/extended_abstracts/index-web.html

6-10. diagram Országos Meteorológiai Solgálat

11. diagram

https://lpdaac.usgs.gov/products/aster_products_table/on_demand/surface_kinetic_temperature/v1/ast_08

12-13. diagram

https://lpdaac.usgs.gov/products/aster_products_table/on_demand/surface_kinetic_temperature/v1/ast_08

14-16. diagram

https://lpdaac.usgs.gov/products/aster_products_table/on_demand/surface_kinetic_temperature/v1/ast_08

17-18. diagram

https://lpdaac.usgs.gov/products/aster_products_table/on_demand/surface_kinetic_temperature/v1/ast_08

19-21. diagram

https://lpdaac.usgs.gov/products/aster_products_table/on_demand/surface_kinetic_temperature/v1/ast_08

22-25. diagram

https://lpdaac.usgs.gov/products/aster_products_table/on_demand/surface_kinetic_temperature/v1/ast_08

26-33. diagram

https://lpdaac.usgs.gov/products/aster_products_table/on_demand/surface_kinetic_temperature/v1/ast_08

34-35. diagram

K. Anandakumar, K. (1999): A study on the partition of net radiation into heat fluxes on a dry asphalt surface, *Atmospheric Environment*, Volume 33, Issues 24–25, October 1999, p. 3911-3918.

X. Felhasznált internetes források

www.bkv.hu

<http://eos.nasa.gov/>

http://eosweb.larc.nasa.gov/HBDOCS/hdf_data_manipulation.html

http://www.greenrooftechnology.com/green_walls

<http://lpdaac.usgs.gov>

<http://maps.google.hu>

<http://modis-land.gsfc.nasa.gov/temp.html>

<http://www.nasa.gov/>

http://www.vzlu.cz/images/cfd_pro_stavebnictvi.jpg

<http://www.greeninfrastructure.net/content/definition-green-infrastructure>